



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

Los inicios de las obras de hormigón en contacto con agua.

Autor/a

Carlos Domingo Force

Tutor/a

Antonio Aguado de Cea

Climent Molins Borrell

Departament

Enginyeria de la Construcció

Intensificació

Tecnologia i Construcció d'Estructures

Data

Julio de 2012

LOS INICIOS DE LAS OBRAS DE HORMIGÓN EN CONTACTO CON AGUA

Autor: Carlos Domingo Force

Tutores: Antonio Aguado de Cea / Climent Molins Borrell

RESUMEN

El hormigón es actualmente el material utilizado por excelencia en la construcción tanto de obras marítimas como fluviales. El conocimiento de este material frente a la acción del agua viene determinado por su estudio y por la experiencia acumulada en las diferentes obras realizadas a lo largo del tiempo. La resistencia mostrada frente a las solicitaciones más habituales, la buena trabajabilidad y el bajo coste de este tipo de obras realizadas con hormigón frente a otros materiales, son las cualidades que le han permitido alcanzar esta posición dominante.

El desarrollo económico provocado por la Revolución Industrial a finales del siglo XVIII genera un crecimiento en el tráfico marítimo al que los puertos no pueden hacer frente, nuevas obras y ampliaciones de los mismos son necesarias. En España, esta evolución portuaria se hace presente a partir de la segunda mitad del siglo XIX, con la creación de las Juntas de Obras de los principales puertos, dirigidas por los Ingenieros de Caminos de la época que con sus proyectos pretenden dar solución a los problemas generados por las escasas infraestructuras portuarias.

Desde la creación de las Juntas hasta los comienzos del siglo XX, los ingenieros españoles proyectaban las obras de los muelles y diques de una forma similar a la usada por los ingenieros romanos, mediante construcciones utilizando bloques de hormigón, hormigón en masa sumergido o sistemas concertados. Las estructuras de hormigón fabricado con cales hidráulicas se presentan como sustitutas a las estructuras realizadas con piedra natural, cada vez más costosa de conseguir.

La necesidad de alcanzar calados cada vez mayores para ampliar los puertos, provoca que a principios del siglo XX los ingenieros empiecen a utilizar grandes cajones en las obras de abrigo de los puertos, fáciles de construir, transportar y poner en obra con unos resultados satisfactorios. Estos cajones estaban fabricados habitualmente de hormigón armado, como es el caso de las obras de ampliación del dique del Este del puerto de Barcelona (1905), aunque la primera vez que se usó con éxito este sistema constructivo en España fue en Bilbao (1897) donde los cajones estaban contruidos en hierro.

La propagación del conocimiento experimental del hormigón armado y las primeras teorías de cálculo presentadas en el año 1910, impulsan el uso de este material en diferentes tipos de estructuras, como es el caso de embarcaderos o el intento fallido de los barcos de hormigón armado que posteriormente se reutilizarían como diques rompeolas. La permeabilidad del hormigón origina que las estructuras en contacto con el agua de mar se pudieran ver sometidas a un proceso de ataque químico, para evitar esta problemática se impermeabilizaba el hormigón aplicándole enlucidos o bien se utilizaba materia puzolánica en su dosificación.

La experiencia aportada por estos primeros ingenieros que optaron por sistemas alternativos de construcción, entre otras muchas cosas, ha hecho posible que actualmente las empresas constructoras españolas sean un referente mundial en el ámbito de los cajones flotantes de hormigón armado.

Palabras clave: puertos, cajones, hormigón armado, historia, evolución precios, agua.

THE BEGINNING OF CONCRETE WORKS IN CONTACT WITH WATER

Author: Carlos Domingo Force

Tutors: Antonio Aguado de Cea / Climent Molins Borrell

ABSTRACT

Concrete is currently the excellence material used for maritime and river works constructions. The knowledge of this material against the action of water is determined by their study and the accumulated experience in various works carried out over time. The resistance shown against the most common requests, good workability and low cost of such work carried out with concrete over other materials are the qualities that have allowed the concrete to achieve this dominant position.

The economic development caused by the Industrial Revolution in the late eighteenth century generated a growth in maritime traffic that the ports cannot cope; new works and extensions of these ports are needed. In Spain, the port development is present from the second half of the nineteenth century with the creation of the Societies of Works of the main ports, directed by the Civil Engineers of the time that with their projects aim to solve the problems caused by poor port infrastructure.

Since the creation of the Societies of Works until the early twentieth century, the Spanish engineers planned the work of the piers and docks in a similar way that was used by Roman engineers, by constructions using blocks of concrete, mass concrete systems submerged or concerted. The concrete structures made with hydraulic limes are presented as a substitute for natural stone structures, due to the difficulty to obtain them.

The need to achieve ever-increasing drafts for expanding ports, causes early twentieth century engineers to start using large caissons in the works of shelter ports, easy to build, transport and putting in work with satisfactory results. These caissons were usually made of reinforced concrete, such as the redevelopment of the eastern pier of the port of Barcelona (1905), although the first time successfully used this building system in Spain was in Bilbao (1897) where the caissons were constructed in iron.

The spread of experimental knowledge of reinforced concrete and the first theories of calculation presented in 1910, driving the use of this material in different types of structures such as jetties or boats. The reinforced concrete boats were a failed attempt what would later be used as a breakwater dikes. The permeability of concrete structures which originates in contact with sea water could be seen under an etching process to avoid this problem was waterproofed the concrete by applying plaster or pozzolanic material was used in its dosage.

The experience gained from these first engineers who opted for alternative construction systems, among other things, has enabled the Spanish construction companies now be one referent worldwide leader in the field of reinforced concrete caissons.

Keywords: ports, caissons, reinforced concrete, history, evolution rates, water.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis tutores, Antonio Aguado y Climent Molins, la ayuda prestada para elaborar esta tesina, corrigiendo los errores cometidos y orientando para su mejora.

Agradecer también las facilidades ofrecidas por los responsables de los Archivos Históricos de los Puertos de Tarragona (Coia Escoda) y de Barcelona (Javier Aznar), así como la disponibilidad de sus empleados, en especial, Paco.

Índice

Capítulo 1: Introducción y objetivos	1
1.1. Marco de referencia	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodología	2
Capítulo 2: Contexto histórico	5
Capítulo 3: Finales del s. XIX, continuismo visto desde las obras del puerto de Tarragona	9
3.1. Introducción	9
3.2. Sistema de construcción con bloques de hormigón	12
3.2.1. Historia	12
3.2.2. Definición de la obra	12
3.2.3. Materiales	13
3.2.4. Método constructivo	16
3.2.5. Evolución del sistema	17
3.3. Sistema de construcción con hormigón en masa	18
3.3.1. Historia	18
3.3.2. Definición de la obra	19
3.3.3. Materiales	19
3.3.4. Método constructivo	21
3.3.5. Evolución del sistema	22
3.3.6. Comparativa de ambos sistemas	23
3.4. Sistema de construcción concertado	25
3.4.1. Historia	25
3.4.2. Definición de la obra	26
3.4.3. Materiales	28
3.4.4. Método constructivo	30
3.4.5. Evolución del sistema	31
3.5. Estado actual de las obras	32
Capítulo 4: Comienzos del s. XX, auge en el uso de cajones.	
Experiencias en los puertos de Bilbao y Barcelona.....	35
4.1. Introducción	35
4.2. Cajones metálicos (Dique del Oeste del puerto de Bilbao)	36
4.2.1. Definición de la obra	36
4.2.2. Materiales	40
4.2.3. Método constructivo	41
4.2.4. Evolución del sistema	44
4.2.5. Estado actual	45
4.3. Cajones de HA (Dique del Este del puerto de Barcelona).....	46
4.3.1. Definición.....	46

4.3.2. Materiales.....	53
4.3.3. Método constructivo.....	56
4.3.4. Evolución del sistema en otros puertos	60
4.3.5. Estado actual	62
Capítulo 5: Otras estructuras ejecutadas en hormigón armado	65
5.1. Introducción	65
5.2. Embarcaderos sobre el río Guadalquivir	65
5.3. Barcos de hormigón armado	69
5.3.1. Marco internacional.....	69
5.3.2. Marco estatal	71
5.3.3. Comparativa de buques construidos en cemento armado, madera y acero	76
5.3.4. Barcos de hormigón armado utilizados como diques.....	77
Capítulo 6: Conocimiento del hormigón armado en la época estudiada.....	79
6.1. Introducción	79
6.2. Resistencia del hormigón.....	79
6.3. Resistencia del acero.....	80
6.4. Adherencia	80
6.5. Acción del agua del mar sobre los hormigones	81
6.6. Impermeabilidad del hormigón.....	82
6.7. Corrosión de las armaduras.....	83
6.8. Durabilidad	84
Capítulo 7: Conclusiones	85
7.1. Conclusiones generales.....	85
7.2. Conclusiones específicas	86
7.2.1. Respecto a obras tipo de finales del s. XIX.....	86
7.2.2. Respecto a obras tipo de inicios del s. XX.....	87
7.2.3. Respecto a otras estructuras ejecutadas en hormigón armado.....	87
7.2.4. Respecto al conocimiento del hormigón armado de la época	88
7.3. Perspectivas de futuro	88
Capítulo 8: Bibliografía	89
8.1. Bibliografía referenciada	89
8.2. Páginas webs.....	91
Anejo 1: Ensayos de los cementos.....	I

Capítulo 1: Introducción y objetivos

1.1. Marco de referencia

Actualmente, el hormigón es uno de los materiales más utilizados en estructuras que están contacto con agua, ya sea salada o dulce. El gran conocimiento de este material, su comportamiento frente a la acción del agua y su economía ha permitido al hormigón prácticamente monopolizar obras tan importantes como pueden ser diques, muelles o depósitos.

Hasta llegar a este nivel de conocimiento han sido muchos los años que han tenido que pasar, desde las primeras experiencias hasta las actuales formulaciones, haciendo posible la adecuación del material y de la estructura a cada tipo de obra.

Hoy en día es común ver nuevas construcciones de diques empleando grandes cajones de hormigón armado, esta normalidad es fruto de la gran cantidad de obras ya realizadas con un sistema similar y puede llegar a parecer que se deban ejecutar así simplemente por inercia.

La ingeniería es una rama del conocimiento que destaca por el continuo avance o perfeccionamiento, donde lógicamente predomina la corriente del ‘qué se puede hacer’ frente a la del ‘cómo y por qué se hizo’. Con la realización de esta tesina se pretende dar respuesta a esta segunda pregunta, cuyo estudio de forma indirecta puede dar ideas como para responder a la primera. También se quiere destacar el buen hacer de los

primeros ingenieros, que no sin riesgos, apostaron por un tipo de construcción que ha llegado a la actualidad con unas bases tan asentadas.

1.2. Objetivos

Partiendo de la segunda mitad del siglo XIX, cuando las obras portuarias en España tienen una gran eclosión con el hormigón como material predominante, esta tesina tiene como objetivo principal dar a conocer la evolución de estas obras y los diferentes tipos de construcciones utilizados en base a la documentación técnica disponible de la época.

Se intentará buscar la existencia de paralelismos entre las obras realizadas en los diferentes puertos de España, para conocer si el uso de un determinado tipo de construcción era único o se seguía un patrón preestablecido. Se pretende estudiar el conocimiento que se tenía del material, su comportamiento, los problemas con los que se encontraban y las soluciones que se aportaban.

1.3. Metodología

Planteado un primer enfoque de cómo abordar la realización de la tesina, el primer paso a seguir en cualquier estudio de investigación de este tipo consiste en conseguir la máxima información posible dentro del marco temporal establecido. En este proceso, la criba de los documentos meramente informativos de los técnicos es esencial.

La disponibilidad geográfica de un servidor ha permitido tener acceso a los archivos históricos de los puertos de Tarragona y Barcelona, de gran entidad dentro del sistema portuario español, donde se pueden encontrar los principales proyectos de las obras realizadas en estos puertos desde aproximadamente el año 1850.

La consulta por internet de la base digital de las publicaciones de libre acceso de la Revista de Obras Públicas y la de documentos relacionados ha permitido disponer de una amplia información técnica de la época.

Gracias al acceso a los proyectos y memorias originales de los puertos de Tarragona y Barcelona se ha decidido realizar un estudio minucioso de estas obras, haciendo hincapié en detalles como los motivos de su construcción, el material utilizado o el

proceso constructivo utilizado, así como la relación con otros puertos. El estudio de estas obras ocupará gran parte del tercer y cuarto capítulo de la tesina.

Tras ver el primer uso de hormigón armado en cajones, en el quinto capítulo se estudiará la utilización de este material en otras estructuras en contacto directo con agua, como fueron los embarcaderos sobre el río Guadalquivir y la breve aventura de los barcos de hormigón armado.

Finalmente, en el sexto capítulo, se comprobará el nivel de conocimiento que se tenía del hormigón armado en la época desde el punto de vista de las obras estudiadas y los ensayos presentados en la Revista de Obras Públicas por los ingenieros coetáneos.

Capítulo 2: Contexto histórico

Se considera que fue en la Antigua Grecia, hacia el año 500 a.C., donde se originó el primer hormigón de la historia con cemento natural, una mezcla de compuestos de caliza calcinada con agua y arena, añadiendo piedras trituradas, tejas rotas o ladrillos, usando tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini, una isla de origen volcánico al sureste del territorio continental griego.

El entramado comercial de la civilización griega tenía una sólida base asentada en la existencia de puertos (Yepes, 2012) que permitían el movimiento de buques entre las diferentes polis griegas. A falta de un documento acreditativo, esta simultaneidad temporal de sucesos hace pensar a un servidor que posiblemente fuera la civilización griega la primera en utilizar el hormigón como material de construcción de sus puertos.

Documentos que sí encontramos en Roma, gracias a la obra clásica de Vitruvio “Los diez libros de arquitectura”, donde su quinto volumen está dedicado íntegramente a la construcción en el mar y en el primer tomo se hace alguna breve referencia a las obras portuarias. Éste se trata de un documento esencial para conocer las técnicas constructivas y el uso del hormigón en esta civilización.

Los ingenieros romanos supieron aprovechar las características que ofrecía el hormigón para realizar construcciones reconocidas hoy en día, como pueden ser la cúpula del Panteón de Agripa de 43 metros de luz o los arcos del Coliseo Romano. Aunque no solo fue utilizado en la edificación, el hormigón también se usó en construcciones que

estaban en contacto permanente con agua, como por ejemplo, la red de alcantarillado de Roma o los diferentes puertos que el Imperio tenía a lo largo de su territorio.

Los ingenieros civiles (Peña, 2001) encargados de diseñar todo el sistema portuario romano tenían un amplio conocimiento del clima marítimo, los temporales y su frecuencia de presentación en la zona elegida para construir el puerto, optando por una tipología constructiva u otra dependiendo de las condiciones con las que se encontraban.

Los perfiles de los diques y muelles expuestos en el texto técnico de Vitruvio eran tres: el dique/muelle vertical de hormigón en masa, el dique/muelle vertical de bloques de hormigón y el dique vertical de paredes de sillería. En ocasiones estos perfiles se combinaban para la ejecución de obras de una mayor magnitud, como es el caso del puerto construido en la ciudad de Cesarea Marítima (*Figura 1*), en la costa de Israel. El legado de los ingenieros romanos en materia portuaria llegará de forma casi intacta a mediados del siglo XIX como se podrá comprobar a lo largo de esta tesina.

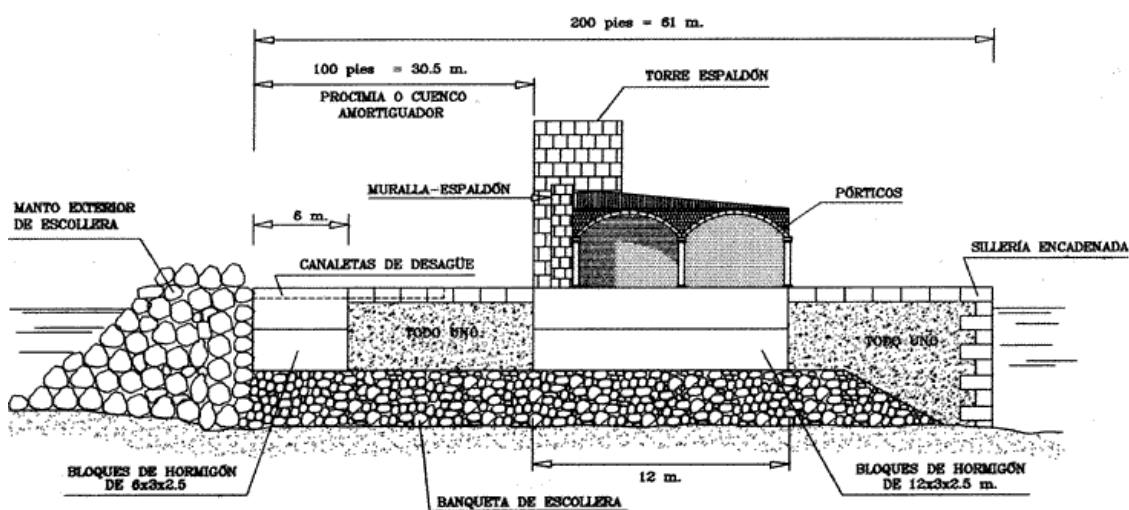


Figura 1. Sección tipo del dique exterior de Cesarea Marítima (Peña, 2001).

La ingeniería civil romana en general, pero sobre todo la rama que se dedicó a las obras en el mar, experimentó un gran avance en comparación con los logros alcanzados en este campo por otras culturas del Mediterráneo debido al descubrimiento y uso de morteros y hormigones hidráulicos utilizando tierra de las regiones de Cumas y de Bayas con alto contenido en polvo puzolánico.

Tras la caída del Imperio romano, la utilización del hormigón como material de construcción civil entró en desuso, así como las obras portuarias que se redujeron

considerablemente debido a la nueva distribución territorial y el descenso del comercio marítimo.

No fue hasta finales del siglo XVIII y comienzos del siglo XIX, cuando el uso del hormigón en la construcción tuvo el auge necesario para volver a convertirse en uno de los materiales esenciales de la ingeniería y arquitectura. El descubrimiento del cemento Portland en el año 1824 por parte de Joseph Aspidin y James Parker ayudó notablemente a este aumento del uso del hormigón como material constructivo.

Otro de los avances que ayudaron a consolidar este material fue la invención del hormigón armado, cuyo origen se atribuye a Joseph Monier en 1867, aunque con anterioridad otros inventores como William Wilkinson o Jean-Louis Lambot habían presentado patentes donde se observa la utilización de armaduras de metal recubiertas de hormigón o cemento.

El desarrollo de la actividad portuaria en el siglo XIX, por tanto, la necesidad de mejores infraestructuras, está marcado por diversos factores: la transición del uso de barcos de vela a los barcos de vapor; el auge del carbón y del hierro; la liberación del comercio; y la mecanización de los trabajos. Los puertos pasan de ser meros refugios y se convierten a finales del siglo XIX en un espacio de intercambio, almacenaje de mercancías y de construcción y reparación de buques, con infraestructuras de dimensiones y costes hasta entonces desconocidos.

Durante la segunda mitad del siglo XIX las obras de los puertos dejan de ser jurisdicción del Ministerio de Fomento y pasan a ser dirigidas por las Juntas de Obras, cuyo mando lo toman ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, sustituyendo a los ingenieros de la Marina, hecho que permitió una mayor especialización y avance en este tipo de obras como se puede ver a lo largo de los siguientes capítulos.

Capítulo 3: Finales del s. XIX, continuismo visto desde las obras del puerto de Tarragona

3.1. Introducción

En 1869 se forma la Junta de Obras del puerto de Tarragona con la intención de administrar las subvenciones procedentes del Ayuntamiento, la Diputación Provincial y el Gobierno del Estado. Desde este organismo se considera que el tamaño del puerto se quedaba escaso como para soportar la carga de tráfico de mercancías futuro, debiéndose ampliar la longitud de los muelles y diques, dando cabida a un mayor número de buques. El encargado de llevar a cabo el proyecto de ampliación del puerto sería el ingeniero jefe Saturnino Bellido.

Don Saturnino Bellido Díaz (Ablitas, Navarra, 1840 – Zaragoza, 1920. *Figura 2*) finalizó sus estudios de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos en Madrid como octavo de veinte estudiantes de la promoción del año 1871, fue destinado a la provincia de Soria y posteriormente, en 1873, se le trasladó a la provincia de Zaragoza donde realizó diversas obras de canalización para mejorar el sistema de agricultura de la zona. En 1876 fue reclamado por la Junta de Obras del Puerto de Tarragona para trabajar como director de esta tras el cese de Don José Álvarez, director anterior. La dedicación de este ingeniero le ha llevado a disponer hoy en día de dos calles en su honor, una en la ciudad de Tarragona y otra en Jaca (Huesca).



Figura 2. Retrato de Saturnino Bellido y portada del proyecto de Obras Interiores (Archivo histórico del puerto de Tarragona).

Bellido afronta las obras del puerto de Tarragona partiendo de la configuración en que se encontraba entonces el puerto, donde únicamente estaban contruidos el dique de abrigo, conocido como dique de Levante, y el dique transversal. La principal dificultad de las nuevas obras se encontraba en el trazado del dique transversal, pues según Bellido su construcción se llevó a cabo a través de teorías no demasiado experimentadas, generando una configuración que perjudicaba el establecimiento de muelles y dársenas, por tanto, el aprovechamiento de esta parte del puerto, grave problemática si se tiene en cuenta que esta zona es la más abrigada de todo el puerto de Tarragona. El error de este trazado se debió a que el dique transversal fue proyectado de forma aislada, cuando las obras de un puerto se deben de proyectar pensando en conjunto.

Al ser inútil pretender cambiar esta configuración, considerando el dique transversal como divisorio entre los puertos de comercio y de refugio, el ingeniero Saturnino Bellido plantea las obras interiores tratando de sacar el mayor partido posible del puerto de comercio. Un puerto que hasta la fecha únicamente contaba con amarres en el dique de Levante, estando éstos gran parte del tiempo a plena ocupación y donde los buques solo podían descargar normales al muelle, siendo más óptima la posición de carga y descarga paralela al muelle. Estas obras serían proyectadas para satisfacer las necesidades del comercio durante un largo periodo de tiempo, ya que era prácticamente imposible agrandarlo.

Las obras interiores que se consideraron necesarias para aumentar la longitud de muelles y mejorar el puerto de comercio fueron: terminar y ensanchar el muelle de Levante; construir un muelle de Costa que partiendo del punto conveniente del dique de Levante y normal al mismo, fuera hasta el Lazareto, continuarlo después por la playa del Serrallo; y convertir también en muelle la parte interior del dique transversal. Las obras proyectadas por Saturnino Bellido se pueden observar resaltadas en la *Figura 3*:

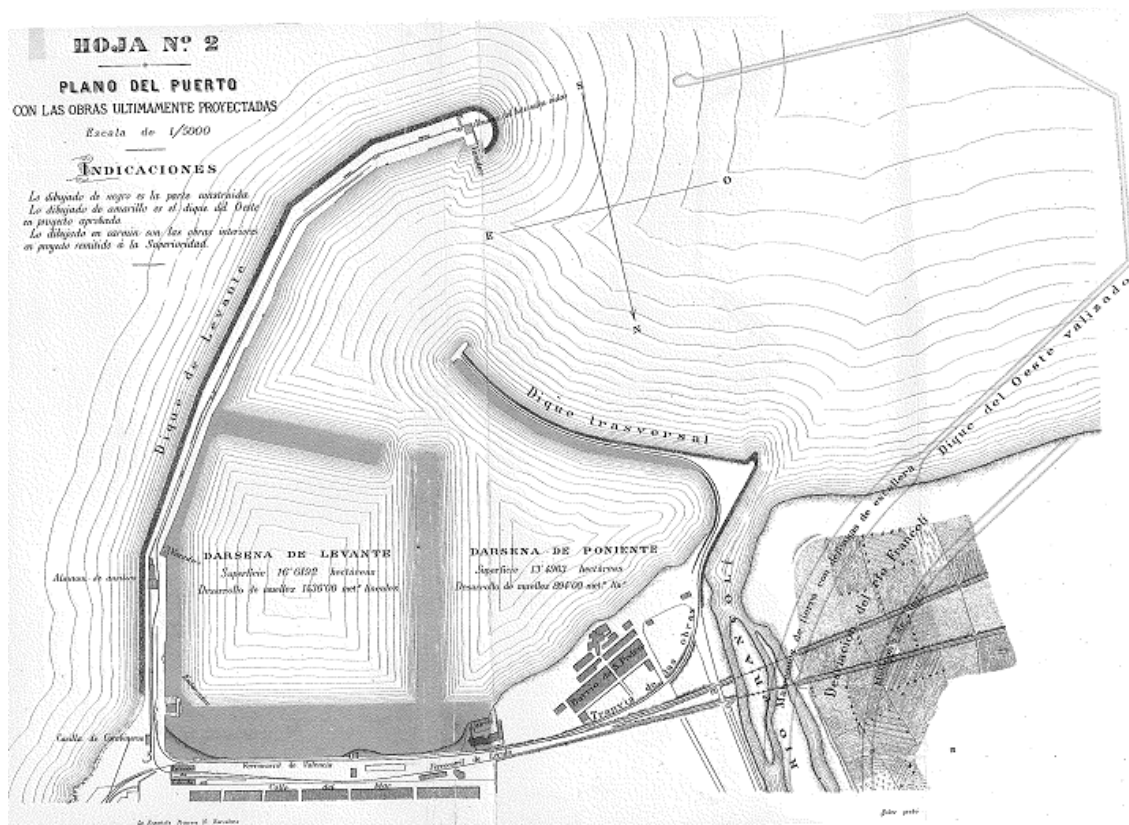


Figura 3. Ampliación de obras interiores del Puerto de Tarragona en el año 1882 (Bellido, 1882).

Se propone (Bellido, 1882) la construcción de estos muelles mediante dos de los sistemas constructivos más habituales de la época para este tipo de obra portuaria, mediante muros formados por bloques de hormigón o mediante muros construidos con hormigón en masa.

3.2. Sistema de construcción con bloques de hormigón

3.2.1. Historia

Este sistema de construcción marítima tiene sus orígenes en Roma, donde según el texto de Vitruvio “Los diez libros de arquitectura”, se utilizaban los bloques artificiales como núcleo en diques de abrigo y muelles portuarios. Estos diques (Peña, 2001) se construían si las condiciones eran las siguientes: existencia de una playa apropiada, calidad de fondo aceptable, posibilidad de utilizar cemento de Puzol, pequeños y medianos calados, solicitaciones de fuerte oleaje y la obra se iba a asentar en mar abierto. La *Figura 4* muestra una reproducción de la construcción de este tipo de diques:

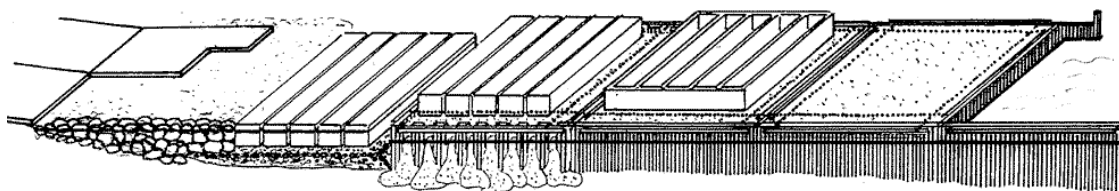


Figura 4. Proceso de construcción de muelles y diques utilizando bloques de hormigón en Roma (Peña, 2001).

Para su construcción se acondicionaba el terreno con una banqueta de asiento de escollera. En el perímetro de esta banqueta se hincaba un recinto de tablestacas con una altura superior al nivel del mar, posteriormente se rellenaba en su totalidad este recinto de arena. Sobre esta plataforma se posicionaban los encofrados de madera para hormigonar in-situ los bloques. Una vez fraguados y retirados los encofrados, se abrían compuertas especialmente construidas en las tablestacas para dejar fluir la arena y permitir que los bloques asentasen sobre la banqueta de escollera.

3.2.2. Definición de la obra

El sistema de construcción con bloques de hormigón fue el mayoritariamente empleado durante el siglo XIX por parte de los ingenieros de la época en la ampliación y construcción de nuevos muelles. En el caso del puerto de Tarragona, se proyectó utilizar 6 o 7 hiladas de bloques artificiales de hormigón para salvar una profundidad de 8 o 9 metros, respectivamente. Cada uno de estos bloques tendría unas dimensiones de 4 metros de largo, dos de ancho y 1,33 metros de altura, generando un volumen de 10,64

metros cúbicos. En la *Figura 5* se puede observar el perfil propuesto para los nuevos muelles:

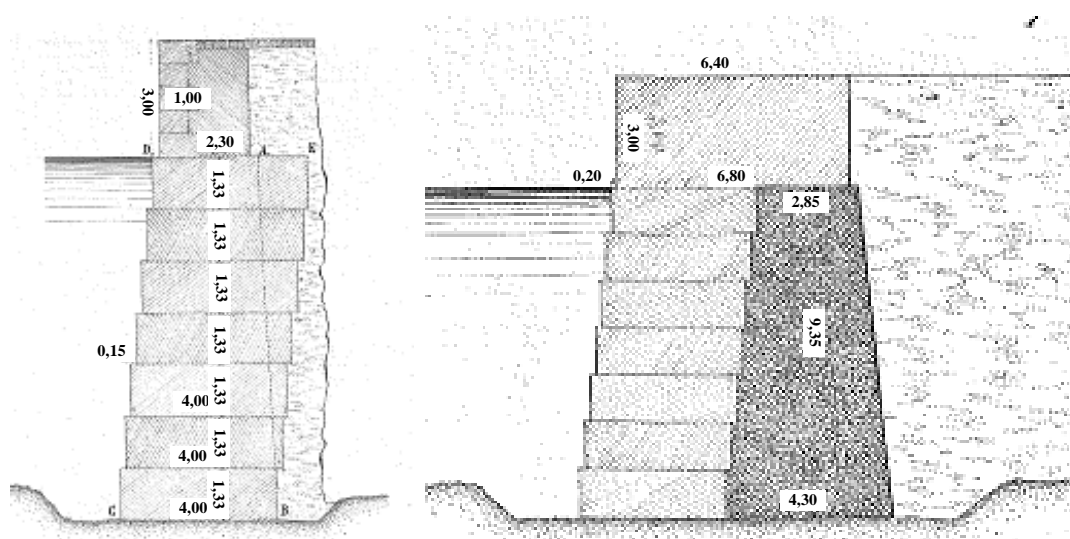


Figura 5. Diferentes secciones del muro construido con bloques de hormigón (Bellido, 1882).

Análogamente a lo realizado en el puerto de Barcelona y otros puertos españoles, en vez de construir un paramento totalmente vertical se decidió proporcionar un pequeño talud, colocando cada bloque para que se formaran escalones de 15 centímetros en el paramento exterior. Esto no dificultaría el atraque de los buques y proporcionaría una mayor estabilidad al muro y facilitaría su construcción.

3.2.3. Materiales

La dosificación del hormigón utilizado en estos bloques se compone por metro cúbico de: 200 kg de cal hidráulica de Theil¹ en polvo; 0,50 m³ de arena; 0,95 m³ de piedra machacada; además del agua necesaria para su manipulación.

La cal hidráulica de Theil tenía que ser de primera calidad y las partidas que perdían sus cualidades hidráulicas eran rechazadas. Bastaba con que dos o tres sacos elegidos al azar no resultasen ser de buenas condiciones para rechazar toda la partida de cal.

La arena debía de ser de grano grueso (uno o dos milímetros) y estar bien limpia de tierra y substancias extrañas, proviniendo siempre que fuera posible de la que traían los buques de Barcelona y en caso de necesidad del río Francolí, cercano al puerto.

¹ Cal hidráulica mayoritariamente utilizada en las obras portuarias de la época proveniente de una localidad cercana a Marsella (Francia).

La piedra se conseguía de una cantera cercana al puerto, ofrecía buenas cualidades ya que no se descomponía ni en el aire ni en el agua y era bastante rugosa. El tamaño máximo de las aristas machacadas no superaba los 8 centímetros. La piedra se lavaba instantes antes de su puesta en obra con la intención de quitar el polvo y mejorar la adherencia del mortero.

La elaboración del mortero (ver *Anejo 1*) se realizaba con las proporciones de cal de Theil y arena anteriormente descritas, batiendo y mezclando los componentes hasta conseguir una mezcla homogénea y con la fluidez necesaria para una buena manipulación. En este proceso se utilizaban tanto batideras de mano como mecánicas. Posteriormente, se mezclaba este mortero con la piedra machacada de manera que todos y cada uno de los fragmentos de piedra quedaban completamente recubiertos por el mortero.

El Ingeniero Director de las obras era el principal responsable de decidir el punto adecuado de fluidez de la mezcla. Tanto el mortero como el hormigón se debían de utilizar tras fabricarse, en caso de que no se hubiera empleado en el mismo día de fabricación se rechazaba. En la *Tabla 1* se muestra el coste de los materiales utilizados para fabricar un metro cúbico hormigón de los bloques, así como los costes derivados:

Tabla 1. Coste de fabricación y colocación de un metro cúbico de hormigón para bloques (Bellido, 1882).

Concepto	Precio real de 1882 (ptas.)	Precio actualizado a 2012 (€) ²
200 kg de cal hidráulica de Theil	8,00	16,86
0,50 m ³ de arena	0,75	1,58
0,95 m ³ de piedra machacada	4,50	9,49
Agua dulce	0,30	0,63
Carga y descarga	1,00	2,11
Mampostería y moldeado	5,00	10,54
Colocaciones en obra	4,60	9,70
Transporte del material principal	2,85	6,01
TOTAL	27,00	56,92

Tomando como referencia el banco de datos BEDEC de 2012 del ITeC, se puede hacer una estimación de la variación del coste de los materiales, para ello se utilizarán las

² 1 peseta de 1882 = 2,108 euros de 2012 (Elaboración a partir de Carreras, 2005)

mismas proporciones de cada material que las utilizadas en el proyecto de Bellido, sustituyendo el tipo de ligante por cemento Portland, más habitual en la actualidad. El precio de cada componente se detalla en la *Tabla 2*:

Tabla 2. Coste actual de fabricación de un m³ de hormigón para bloques (BEDEC, 2012).

Concepto	Precio BEDEC 2012 (€)
200 kg de Cemento pórtland I 32,5 N/MR	19,97
0,50 m ³ de arena	14,30
0,95 m ³ de piedra machacada	27,84
Agua dulce	0,15
TOTAL	62,26

Se observa como el coste total de materiales para la fabricación de un metro cúbico de hormigón para bloques experimenta un notable aumento, pasando de 28,52 euros actualizados que costaba en el año 1882 a los 62,26 euros de la actualidad. En la *Figura 6* se representan los pesos del coste de cada material en el conjunto de la mezcla tanto en el año 1882 como en el año 2012.

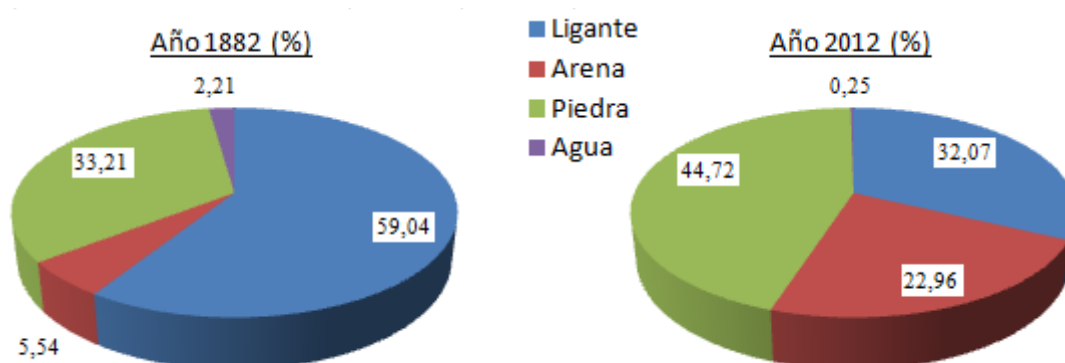


Figura 6. Comparativa del coste de materiales entre el año 1882 y 2012.

Globalmente, los precios de todos los materiales que forman el hormigón, a excepción del agua, han aumentado de una época a otra por encima de la inflación. Relativamente, el material que actúa como ligante ha sufrido una disminución de su coste, mientras que el coste del árido ha aumentado su peso en el precio total de la mezcla.

Se considera que el aumento del precio de la piedra puede ser debido al sobre coste en el transporte que supone tener las canteras alejadas de las ciudades, mientras que la disminución relativa del precio del cemento se puede deber al fuerte proceso de industrialización experimentado en el sector.

3.2.4. Método constructivo

El proceso de fabricación de los bloques, con el tamaño anteriormente citado, se realizaba con un encofrado de madera a forma de caja que se retiraba cuando el hormigón había adquirido suficiente consistencia. El hormigón se colocaba en las cajas en capas horizontales de 30 centímetros de espesor y posteriormente se apisonaba esta capa, así sucesivamente hasta rellenar todo el cajón de madera. Dependiendo de la estación del año en que se encontraran se desencofraba cada bloque a los tres, cuatro o cinco días. Posteriormente, se enumeraba cada bloque y se dejaba fraguar el hormigón entre 3 y 5 meses, dependiendo del juicio del ingeniero jefe.

Para asentar bien los bloques de hormigón se debía dragar el fondo en todo el emplazamiento necesario para la fundación de los muros. El dragado se realizaba hasta la profundidad exacta a la que se habían de llevar los muros, teniendo una tolerancia máxima de 30 centímetros en la nivelación del fondo de arena.

Experimentalmente, se había comprobado que la arena era muy buen cimient, además, el puerto tendía más bien a aterrarse que a socavarse. No habría inconveniente alguno en asentar los bloques sobre la arena siempre que el posterior dragado del puerto no se realizara muy cercano a los muros, algo que podría provocar el descalce de los muros.

Posteriormente, mediante buzos se marcaba el paramento del muro hincando estacas unidas mediante una cuerda. El asiento de la primera hilada de bloques se realizaba tras la comprobación del correcto dragado del fondo. Las siguientes hiladas se posicionaban con un escalón de 15 centímetros con respecto a la hilada anterior. Los bloques se tenían que tocar lateralmente, sin permitir que en ningún punto quedasen separados más de 5 centímetros, ni que tuvieran desniveles que llegasen a los 3 centímetros.

Tras llegar con los bloques al nivel de las aguas de baja mar, a modo de comprobación de la estructura, se colocaba sobre ella una fila más de bloques. Si con la carga de la fila de bloques hubiera algún asiento importante, se retiraban y levantaban todos los bloques que habían sufrido este asiento, para posteriormente volverlos a colocar.

3.2.5. Evolución del sistema

En España, el año 1872, Mauricio Garran, ingeniero director del Puerto de Barcelona, construye los muros (Bellido, 1882) del muelle de la Muralla mediante un sistema de construcción de bloques artificiales de hormigón prácticamente igual al expuesto con anterioridad. Este proyecto es el que toma como base y adapta Saturnino Bellido al puerto de Tarragona.

No únicamente se utilizaban bloques de hormigón en la construcción de muelles, sino que también era posible utilizarlos en obras de mayor entidad como diques rompeolas, como es el caso de Cartagena (Martínez, 1897), donde se finaliza la construcción del dique de la Curra, un rompeolas construido mediante el hundimiento de bloques artificiales de hormigón posicionados estratégicamente para reducir la energía del oleaje incidente, como se puede comprobar en la *Figura 7*:

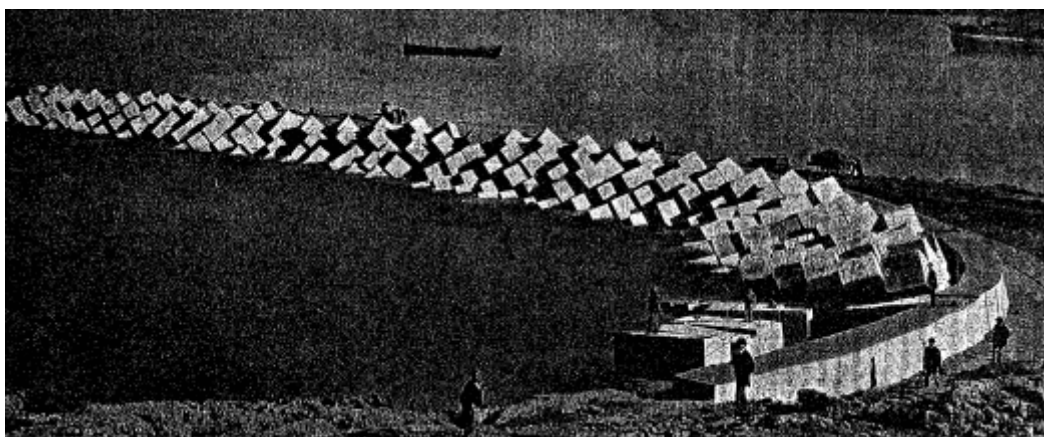


Figura 7. Dique de la Curra, puerto de Cartagena (Martínez, 1897).

La ejecución de obras mediante bloques de hormigón utilizado tanto en muelles como en diques tenía su principal inconveniente en la necesidad de potentes máquinas para elevar o lanzar los bloques, esto suponía un sobre coste importante en los proyectos (Ribera, 1925), con lo que el tamaño de los bloques quedaba limitado así como la magnitud de las obras a ejecutar, al igual que sucedía con los diques contruidos con piedra.

La llegada a principios del siglo XX de los cajones de hormigón armado utilizado y su menor coste de ejecución relegó al sistema de construcción por bloques de hormigón a obras de menor calibre. Un claro ejemplo de esta transición se muestra en la construcción de los muelles de Santa Cruz de Tenerife, del que más adelante se hará

referencia, donde José Eugenio Ribera sustituye grandes bloques de hormigón por cajones de hormigón armado rellenos de hormigón en masa debido al sobre coste del alquiler de la maquinaria para ejecutar la obra de bloques.

3.3. Sistema de construcción con hormigón en masa

3.3.1. Historia

Como el sistema de bloques de hormigón, la construcción obras portuarias utilizando hormigón en masa sumergido también tiene su origen en la civilización romana. En los documentos escritos por Vitruvio, donde se describen las condiciones para el uso de cada tipo de estructura portuaria, se puede comprobar cómo el uso de hormigón en masa estaba ligado a: una playa apropiada, calidad de fondos aceptable, posibilidad de utilizar en obra cemento puzolánico y solicitaciones del oleaje de pequeña entidad.

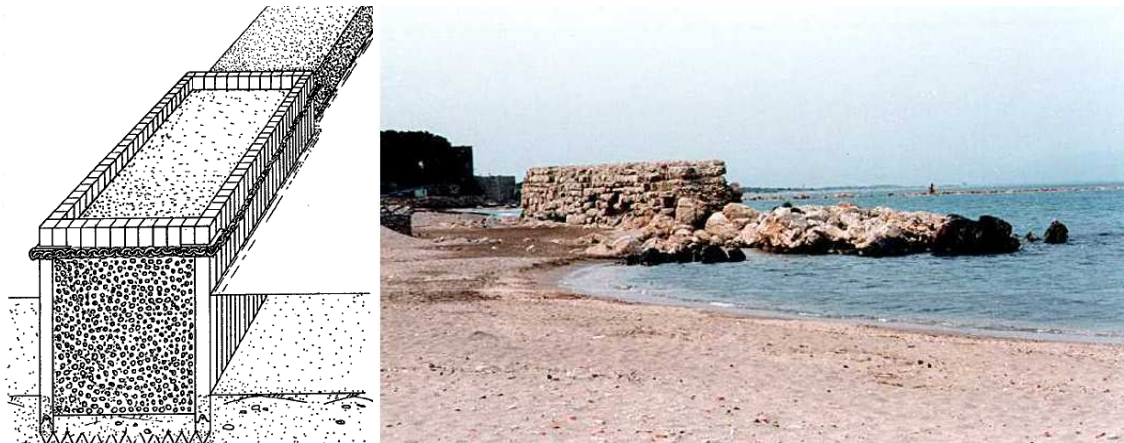


Figura 8. Detalle de la ejecución romana del hormigón en masa y restos del muelle de Empúries (Peña, 2001).

Para su construcción se preparaba el recinto mediante tablestacas de madera de roble, así como se hacía un dragado del fondo. Posteriormente, se hormigonaba bajo el agua, llenando el recinto con conglomerante hidráulico. Transcurrido el tiempo de fraguado, se desencofraba retirando las tablestacas y se procedía a un nuevo avance de la obra. A día de hoy, aún se conservan restos de estos muelles en la localidad catalana de l’Escala, antigua Empúries (*Figura 8*).

3.3.2. Definición de la obra

La propuesta de Saturnino Bellido para el uso del hormigón en masa en la ampliación de los muelles del puerto de Tarragona viene íntimamente ligada a los avances conseguidos en el conocimiento de los efectos de los morteros hidráulicos.

El ingeniero jefe justifica en la memoria del proyecto el uso de los grandes bloques artificiales cuando la agitación de las aguas no permitía el empleo de hormigón en pasta, por problemas de disgregación antes de tener tiempo el hormigón de fraguar, algo que sucedía habitualmente en construcciones en ríos de corriente rápida u obras exteriores de puertos.

La sección propuesta por Saturnino Bellido utilizando este sistema consiste en una fundación de hormigón en masa con ligero talud llegando hasta el nivel de bajamar, para posteriormente coronar con una superestructura de mampostería hidráulica. Las secciones correspondientes a dos tramos de los muelles se observa en la *Figura 9*:

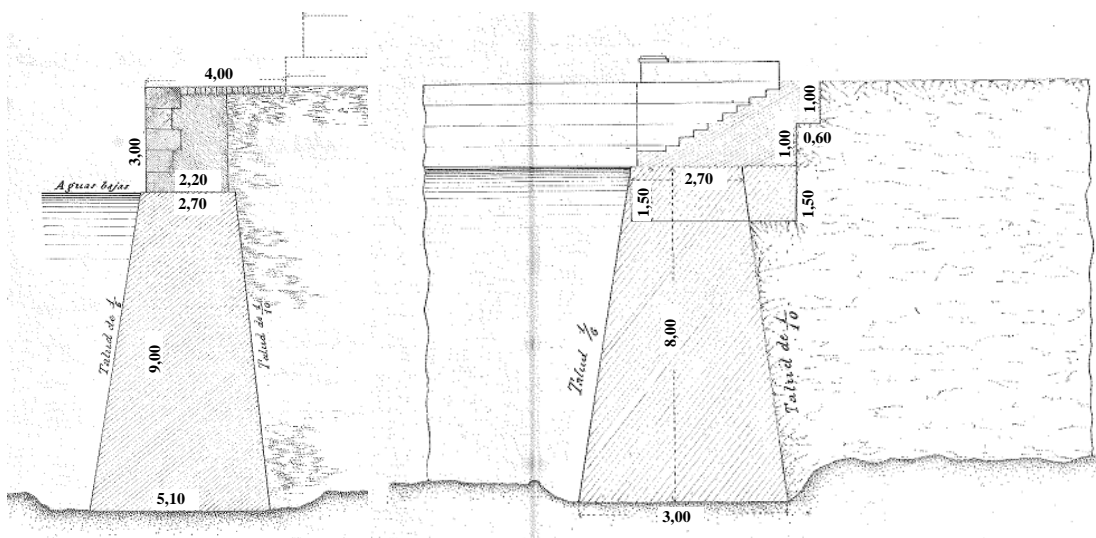


Figura 9. Diferentes secciones del muro construido con hormigón en masa (Bellido, 1882).

3.3.3. Materiales

El hormigón a sumergir fresco que iba dentro de los sacos, así como el de relleno del hueco que queda entre ellos, se componía por metro cúbico de 300 kg de cal hidráulica de Theil en polvo, 0,33 m³ de arena y 0,90 m³ de piedra machacada; además del agua necesaria para su manipulación.

Tanto la cal hidráulica de Theil, como la arena y la piedra utilizada debían tener las mismas cualidades que en el caso del hormigón fabricado para el sistema de los muelles contruidos con bloques de hormigón explicado con anterioridad. Seguía siendo responsabilidad del ingeniero jefe el determinar la fluidez correcta de la mezcla.

El precio total del metro cúbico de hormigón en masa puesto en obra se detalla en la *Tabla 3*:

Tabla 3. Coste de fabricación y colocación del hormigón en fresco.

Concepto	Precio real de 1882 (ptas.)	Precio actualizado a 2012 (€)³
300 kg de cal hidráulica de Theil	12,00	25,30
0,33 m ³ de arena	0,5	1,05
0,90 m ³ de piedra machacada	4,35	9,17
Sacos de tela para los paramentos	2,00	4,21
Agua dulce	0,30	0,63
Transporte de los materiales a pie de obra	2,15	4,53
Manipulación al aire libre	3,00	6,32
Inmersión y mano de obra bajo el agua	3,70	7,80
TOTAL	28,00	59,02

Habiendo estudiado la evolución del precio de los materiales (ver *Figura 6*), se pretende conocer la variación del coste relativo de los materiales y de la puesta en obra de los mismos entre el año 1882 y el año 2012 para este tipo de construcción. Para realizar la comparación, pese a que la normativa EHE-08 no permita el hormigón en masa para la clase de exposición de este tipo de obras, se ha aproximado al tipo de hormigón en masa que se puede ver en la *Tabla 4*.

Tabla 4. Precios descompuestos para la puesta en obra de un metro cúbico de hormigón sumergido (BEDEC, 2012)

Concepto	Precio BEDEC 2012 (€)
Hormigón HM-30/B/20/I+Qb	80,34
Camión con bomba de hormigonar	14,11
Oficial 1a	4,61
Submarinista	9,75
TOTAL	108,81

De nuevo se vuelve a comprobar el aumento del precio del hormigón. En 1882 el coste actualizado a 2012 del material para fabricar un metro cúbico de hormigón sumergido

³ 1 peseta de 1882 = 2,108 euros de 2012 (Elaboración a partir de Carreras, 2005)

era de 40,36 euros y el material necesario para ponerlo en obra era de 18,65 euros, mientras que en 2012 el material tiene un coste de 80,34 euros y la ejecución de 28,47 euros. Gráficamente se puede ver el porcentaje de cada concepto en la *Figura 10*:

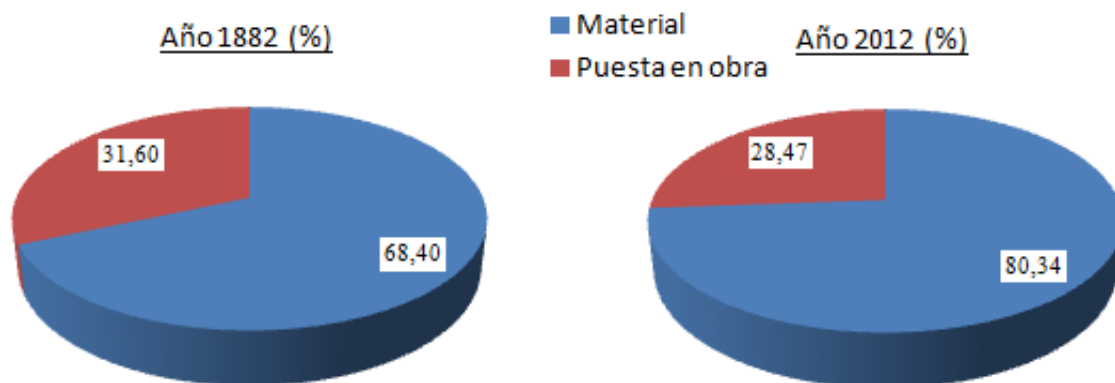


Figura 10. Comparativa porcentual de costes del material y de ejecución entre 1882 y 2012.

Se puede observar como la distribución en ambas épocas es prácticamente la misma, aunque tenemos que tener en cuenta, como veremos más adelante, que el coste de la mano de obra ha aumentado 20 veces de media, con lo que para mantener esta proporción el coste de la maquinaria ha tenido que disminuir, algo que nos puede llevar a pensar en que antes se utilizaba mano de obra barata, sustituida progresivamente por maquinaria.

3.3.4. Método constructivo

El sistema de construcción adoptado se iniciaba replanteando la base del muro en el fondo del mar a la profundidad conveniente con la ayuda de una draga, para posteriormente igualar el suelo a la profundidad justa que debía tener, añadiendo o quitando la poca arena que fuera necesaria por medio de los buzos. Una vez hecho el enrase del asiento, se colocaban cuerdas tensas entre las estacas que marcaban los paramentos interior y exterior, a la altura de 20 centímetros del suelo.

Se colocaba una primera hilada de sacos rellenos de hormigón hasta sus dos terceras partes, colocados a tizón, con 60 centímetros de longitud y con el diámetro necesario para que después de puestos y apisonados diesen una altura de unos 30 centímetros. Las ataduras de los sacos debían colocarse hacia el interior del muro e iban unidos unos a otros.

Habiendo colocado la primera hilada de sacos de hormigón y cuando este hubiera empezado a endurecerse, se variaban las cuerdas que marcaban los paramentos, colocándolas a la altura que corresponde a una segunda hilada, colocados con su mayor dimensión en el sentido longitudinal del muro. Habiendo trozos de muro así contruidos y cuando el hormigón hubiera endurecido para evitar deformaciones, se procedía al relleno del interior de los muretes con hormigón en masa. Este se bajaba con cajas o tolvas rellinando a la vez toda la sección del muro, que se procuraba llevar por líneas normales al muro.

Para que no quedasen huecos y la superficie quedase unida y horizontal, se apisonaba el hormigón ligeramente con pisones de ancha base o con un cilindro de hierro, que podía ser un tubo de fundición como los de conducción de aguas, de 50 centímetros de diámetro y una largura igual a la necesaria para apisonar todo el hormigón que quedaba entre los muretes de vez.

De esta forma se construía una hilada seguida de unos 60 centímetros de altura, cuya superficie superior quedaba bien enrasada y horizontal, y que se hacía seguida de un extremo a otro del muro que se pretendía construir. Hasta que el hormigón de la primera hilada no hubiera fraguado por completo y hubiera adquirido una cierta resistencia para no sufrir deformaciones, no se iniciaba una nueva hilada.

Así se realizaba sucesivamente hasta alcanzar la altura necesaria de los muros. El enrase se cubría con unas tablas transversales al muro, que se cargaban con el peso de piedras necesario para que el hormigón no fuera arrastrado por el agua antes de endurecerse completamente.

3.3.5. Evolución del sistema

El uso del hormigón sumergido se utilizó como cimientto en aquellas obras en las que se podía asegurar una cierta calma del agua que evitase el deslavado de los morteros, por ello fue un sistema adecuado para la construcción de muelles como el explicado, así como en trabajos realizados en recintos de pilotes o tablestacas, por ejemplo, la cimentación de las pilas de puentes.

También era habitual el uso del hormigón sumergido en zampeados y como soleras de los diques de carena (Ribera, 1925), extendiéndose en grandes superficies que conseguían consolidar el terreno natural. Sobre estas soleras se podían construir también los muros laterales dentro de cajones de madera sin fondo que actuaban como molde.

Fueron los ingenieros ingleses los que utilizaron mayoritariamente este sistema de construcción, seducidos por la facilidad de ejecución del hormigón sumergido, siendo la obra de mayor envergadura la del dique de abrigo en el puerto de Wicklow, construida íntegramente en hormigón sumergido en el año 1880. La sección final de este dique y estado actual del dique se puede comprobar en la *Figura 11*:

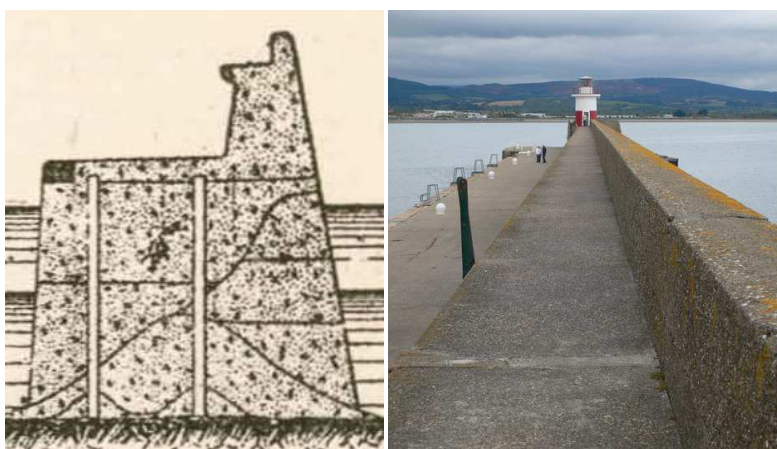


Figura 11. Perfil y estado actual del dique rompeolas de Wicklow en Inglaterra (Ribera, 1925 y www.panoramio.com).

3.3.6. Comparativa de ambos sistemas

Como bien explica Saturnino Bellido en la Memoria de las obras del puerto de 1882, en el sector de la construcción existen modas en los sistemas de ejecución de las obras. En aquella época, era mucho más vistoso el fabricar grandes bloques de hormigón y colocarlos con una maquinaria potente, que no fabricar el hormigón y simplemente sumergirlo en pequeñas cantidades para construir la totalidad de la obra. Pese a ello el ingeniero apuesta por el uso del hormigón en masa para la construcción de los muros de los muelles.

Las razones que podían impedir el sistema de construcción mediante hormigón en masa frente al hormigón en bloques, siempre y cuando se pudiese emplear este sistema, podían ser las de economía, de rapidez de ejecución de las obras y del buen resultado de

estas respecto a su estabilidad. Bellido explica la comparación realizada entre ambos métodos constructivos:

“Si se dispusiese de tiempo suficientemente largo como para secar los bloques antes de sumergirlos, se podrían fabricar los bloques con un hormigón menos hidráulico, consiguiendo así un hormigón más barato que el que se debe emplear para la inmersión del hormigón en masa. En aquella época el coste de las cales y cementos hidráulicos tenía poca importancia respecto al total de la obra.

La demostración de que económicamente el sistema de hormigón en masa es más competitivo se hace a partir del supuesto de coste que tendría la ejecución de un muro de 9 metros de altura media, altura estándar en los muelles que se querían construir. Al fabricar bloques de 1,33 metros de altura, en el caso de construirse mediante bloques de hormigón la altura total acabaría siendo de 9,33 metros para no tener que fabricar bloques de diferentes medidas, con esto resultaría un volumen total de 37,320 metros cúbicos por metro lineal.

Con la sección transversal propuesta en el caso de construir los muros con hormigón en masa sumergido, se obtendría un volumen total de 35,100 metros cúbicos por metro lineal. El exceso de material de utilizar un modo u otro es de 2,22 metros cúbicos, obteniendo un ahorro de 60 pesetas por metro lineal en material. En caso de ser muros de 8 metros, el ahorro es similar.

La rapidez de las obras si se utiliza el hormigón en masa como mínimo debería de ser igual al tiempo empleado por el proceso de construcción con bloques de hormigón, pues el empleo de estos requiere de múltiples operaciones para su confección y puesta en obra.

El sistema de construcción utilizando hormigón en masa tendrá una mayor estabilidad frente a la presión ya que se le puede proporcionar una forma acorde con los esfuerzos solicitantes, proporcionando una figura más racional, algo que con el uso de bloques de hormigón sería más difícil. Además el uso de hormigón en masa conforma un muro completamente monolítico, mientras que el uso de bloques viene unido a la aparición de juntas sobre las cuales actúa de forma constante la presión del mar, tendiendo a la destrucción de la obra.”

Saturnino Bellido, 1882.

Gracias al acceso a los presupuestos (*Tabla 5*) de la obra proyectada se puede calcular la diferencia de coste de la obra total utilizando uno u otro sistema de construcción:

Tabla 5. Presupuesto de las obras usando uno u otro sistema constructivo.

Concepto	Hormigón en masa sumergido fresco (ptas.)	Hormigón hidráulico en bloques artificiales (ptas.)	Diferencia (%)
Terminación del ensanche de los tres últimos tramos del muelle de Levante	335.087,15	335.087,15	0,00
Muelle del dique transversal	619.865,52	629.050,96	1,46
Muelle de cerramiento de la dársena de Levante	838.204,28	842.644,91	0,53
Muelle de Costa	793.544,77	817.943,06	2,98
Embarcadero	37.751,54	38.370,74	1,61
Muelle divisorio	1.367.541,72	1.386.543,68	1,37
Ensanche de los dos primeros tramos del muelle de Levante	612.152,04	621.790,88	1,55
Obras accesorias	42.966,38	42.966,38	0,00
Limpia del puerto	3.327.768,00	3.327.768,00	0,00
TOTAL	7.974.881,40	8.042.165,76	0,84

Como se puede observar en la *Tabla 5*, la diferencia en la ejecución de las obras utilizando uno u otro sistema constructivo es mínima, siendo determinante para su elección la rapidez de ejecución y el comportamiento frente a las acciones del mar.

3.4. Sistema de construcción concertado

3.4.1. Historia

Al igual que los dos sistemas constructivos anteriores, el sistema concertado tiene su origen en la civilización romana, Vitruvio utilizaba una nomenclatura diferente, refiriéndose a él como “dique vertical de paredes de sillería” (ver *Figura 12*). Los condicionantes (Peña, 2001) que se debían de cumplir para el uso de este tipo de estructura eran: la existencia de una playa apropiada, la calidad de los fondos podía variar entre buena y mala, la disposición de pequeño o medianos calados, la

imposibilidad de utilizar el polvo de Puzol, las solicitaciones de fuerte oleaje o cuando la obra se iba a asentar en mar abierto.

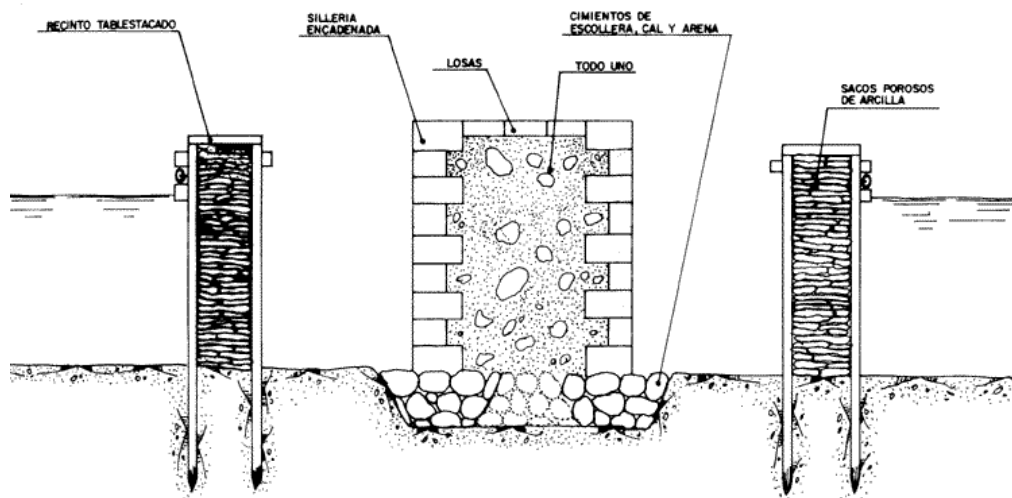


Figura 12. Detalle de la construcción romana de un dique por sistemas concertados (Peña, 2001).

Partiendo desde tierra, creaban ataguías de entibaciones dobles. Se extraía el agua del interior y se preparaba la fundación de los dos muros, en caso de ser un terreno poco cohesivo se utilizaban micropilotes de madera resistentes al agua y a corrosiones. Rematada la cimentación se construía sobre ella los muros perimetrales, con el mayor tamaño de bloque posible para reducir al máximo el número de juntas. Posteriormente, se rellenaba el hueco entre estos muro con un “todo en uno” apisonado y se concluía enlosando la parte superior.

3.4.2. Definición de la obra

Habiéndose proyectado las obras interiores del puerto de Tarragona para aumentar su capacidad comercial, otro de los puntos clave en la ampliación del puerto era el de dotarle de una mayor espacio destinado al refugio de las naves, pues el aportado por el dique transversal era insuficiente. El puerto de comercio en época de temporales también se veía afectado por determinados mares, con lo que se propone la construcción del dique de Oeste para cerrar el puerto (ver Figura 3).

Anterior a Bellido, el ingeniero jefe José Álvarez, ya había proyectado la construcción de un dique del Oeste mediante un sistema de escollera. Bellido observa como la cantidad de piedra necesaria para llevar a cabo la construcción del dique mediante este

método no se puede obtener de las canteras a las que tenía acceso el Puerto de Tarragona y procedente de las canteras más cercanas resultaba cara debido al transporte.

Bellido propone para la construcción de este dique utilizar el sistema de escollera en las profundidades del puerto donde no pueda ser atacada por el mar, mientras que para las zonas donde el mar trabaja utilizar las construcciones concertadas. Se conseguiría así paliar el problema de escasez de piedra de gran tamaño y no habría prácticamente gastos en el mantenimiento de la estructura, ya que los sistemas concertados una vez contruidos se muestran sólidos frente a las acciones del mar y la escollera no podía ser dañada pues sobre sus alineaciones no actuaban los grandes temporales.

El proyecto de construcción del Dique del Oeste del año 1884 presentado por Bellido, que no se llegó a ejecutar pero que puede servir para explicar la construcción más habitual de la época de diques en los puertos, propone ejecutar el dique del Oeste en cuatro alineaciones rectas unidas entre sí por tres curvas, las dos primeras se proyectan con un sistema de escollera mientras que las dos últimas con un sistema concertado. La longitud total del dique es de 1675,60 metros, acabando en un ensanchamiento en forma de morro y que constituirá junto al del dique de Levante la boca del puerto.

Para la realización de esta tesina las alineaciones que tienen un mayor interés y que se estudiarán son aquéllas proyectadas mediante el sistema concertado, donde se combina la utilización del hormigón en bloques, escollera y hormigón en masa.

Como se puede comprobar en la *Figura 13*, el perfil propuesto para este tipo de alineación se compone de paramentos exteriores fabricados con bloques de hormigón de 1,40 metros de altura con un relleno intermedio de escollera ligada con una capa de hormigón en masa. Este tipo de dique, como sucedió en otras construcciones realizadas en la época (Churruca, 1882), permitía obtener una estructura económica que trabajaba solidariamente, capaz de resistir los temporales a los que estaba sometido gracias a su elevado peso propio. Los principales problemas de este tipo de perfiles estaban ocasionados por el descalce de fondo de la estructura fondeada en terrenos poco apropiados.

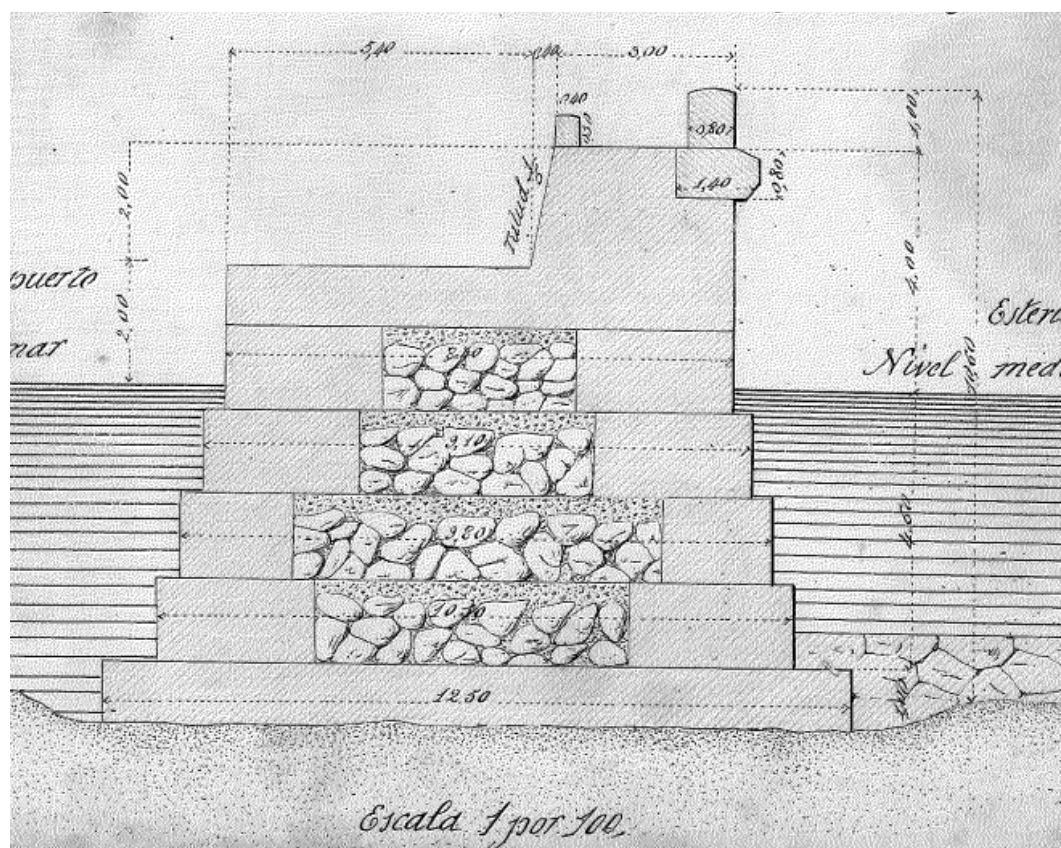


Figura 13. Perfil propuesto para el dique de Oeste (Bellido, 1882).

3.4.3. Materiales

Los bloques de hormigón exteriores de la estructura se componen por metro cúbico de: 0,57 m³ de mortero; y 0,90 m³ de piedra machacada.

El hormigón que se ha de sumergir fresco bajo el agua para la construcción del zampeado de la fundación y para el enrase de la escollera entre las hiladas de bloques artificiales del dique, se compondrá por metro cúbico de 300 kilogramos de cal hidráulica de Theil en polvo; 0,33 m³ de arena; y 0,90 m³ de piedra machacada.

Las cualidades de estos materiales se han explicado con anterioridad en el apartado análogo del sistema de construcción de muelles por bloques artificiales. El coste detallado de fabricación de un metro cúbico de hormigón en cada uno de los casos se muestra en la *Tabla 6* y en la *Tabla 7*:

Tabla 6. Coste de fabricación del hormigón hidráulico de los bloques (Bellido, 1884).

Concepto	Precio real de 1884 (ptas.)	Precio actualizado a 2012 (€) ⁴
0,57 m ³ de mortero	13,11	28,99
0,90 m ³ de piedra machacada	4,50	9,95
Mano de obra de fabricación	3,00	6,63
Cajas y moldes	0,50	1,11
Carga de los bloques en taller	0,35	0,77
Transporte hasta el embarcadero	1,10	2,43
Carga de los bloques en las barcas	0,35	0,77
Transporte por mar hasta el punto de empleo	2,00	4,42
Colocación en obra	3,00	6,63
TOTAL	27,91	61,71

Tabla 7. Coste de fabricación del hormigón fresco (Bellido, 1884).

Concepto	Precio real de 1884 (ptas.)	Precio actualizado a 2012 (€)
300 kg de cal hidráulica de Theil	12,00	26,53
0,33 m ³ de arena	2,00	4,42
0,90 m ³ de piedra machacada	4,50	9,95
Agua dulce	0,30	0,66
Transporte de los materiales a pie de obra	2,65	5,86
Manipulación	1,70	3,76
Inmersión y mano de obra bajo el agua	4,00	8,84
TOTAL	27,15	60,03

El acceso al presupuesto de esta obra ha permitido hacer una comparación de los salarios de la época con los actuales, con lo que se puede estimar la variación global del coste de mano de obra. Este análisis se ha realizado a partir de los salarios cobrados por trabajadores de oficios necesarios para la ejecución de estas obras, coincidentes tanto en el pasado como en la actualidad, en la *Tabla 8* se pueden ver detallados los valores de estos así como la diferencia relativa entre los salarios de ambas épocas.

Tabla 8. Comparativa de salarios entre 1884 y 2012.

Trabajo	Precio real de 1884 (ptas./hora)	Precio actualizado a 2012 (€/hora)	Precio BEDEC 2012 (€/hora)	Diferencia (%)
Albañil	0,45	1,00	18,43	1744,01
Submarinista	1,72	3,82	108,32	2735,51
Carpintero	0,4	0,89	18,76	2011,66
Picapedrero	0,45	1,00	18,43	1744,01
Gruista	0,5	1,11	18,43	1559,61
			Promedio	1958,96

⁴ 1 peseta de 1884 = 2,21 euros de 2012 (Elaboración a partir de Carreras, 2005)

Según estos cálculos, la mano de obra en 1884 resultaba 19,6 veces más barata que la actual, algo que puede sorprender pero no debería extrañar pues las obras ejecutadas por Bellido en el puerto de Tarragona fueron las primeras en que para las tareas más rudimentarias se utilizaban personal cualificado y no reos (Escoda, 2002).

3.4.4. Método constructivo

En la construcción de los dos últimos tramos del dique del Oeste (Bellido, 1884) el ingeniero propone, con el fondo del puerto bien nivelado, realizar un zampeado general de 1 metro de espesor. Este zampeado se realizaba entre muretes contruidos con sacos de hormigón hidráulico, utilizando cajas capaces de abrirse por el fondo para hormigonar todo el recinto. Posteriormente, se nivelaba y apisonaba bien el zampeado para que los bloques superiores asentasen correctamente.

Una vez comprobada la correcta nivelación del sobrelecho del zampeado por parte del Ingeniero Director de las obras se procedía a colocar una hilada de bloques artificiales de hormigón de 1,40 metros de altura en cada paramento del dique, colocándolos alternadamente a soga y tizón, rellenando las juntas con cemento de rápido fraguado.

El posicionamiento de los bloques de hormigón se realizaba con la ayuda de una grúa flotante de gran potencia con un brazo de 14 metros de alcance capaz de llegar al fondo del tramo con mayor calado y levantar las 15 toneladas de peso de cada bloque. Una vez posicionados se procedía a rellenar el espacio interior dejado por los bloques con la escollera que se bajaba en cajas con apertura en el fondo. Esta escollera comprendía todo tipo de dimensiones para que hubiera el mínimo espacio de huecos posible.

La escollera se enrasaba adecuadamente por medio de buzos a una altura de 1,10 metros, 30 centímetros por debajo de la cara superior de los bloques artificiales. Sobre esta escollera se colocaba un volumen de $0,20 \text{ m}^3$ por metro cuadrado de mortero hidráulico, que los buzos se encargaban de hacer introducir con las herramientas adecuadas entre los huecos de la escollera.

Sobre esta capa de cemento se colocaba una tongada de hormigón hidráulico hasta enrasar perfectamente con el sobrelecho de los bloques, apisonándolo bien para posteriormente ubicar otra hilada encima, prestando una especial atención al hormigón

de las proximidades de los paramentos, ya que era donde se ubicaba la mayor parte del peso de los bloques de las hiladas superiores.

Este proceso completo se repetía sucesivamente hasta llegar a las 4 o 6 alturas de bloques, dependiendo del calado de la zona donde se proyectaba el dique del Oeste.

Para comprobar (Bellido, 1884) el correcto comportamiento del sistema se sumergió durante dos meses un cajón con las 4 paredes de bloques de hormigón, relleno de escollera. Al sacarlo del agua a los dos meses de estar sumergido, se comprobaron cómo eran ciertas las previsiones que tenían sobre el comportamiento de este sistema constructivo, pues si bien quedaban algunos huecos entre los mampuestos, estos se encontraron en su mayor parte pegados unos a otros gracias al mortero hidráulico que se introdujo entre ellos, demostrando así el excelente comportamiento de la cal de Theil que se empleaba en las obras portuarias.

3.4.5. Evolución del sistema

Gracias al resumen del X Congreso de Navegación realizado por Carlos de Angulo (Puerto de Barcelona, 1905) se demuestra como el sistema concertado era el mayoritariamente utilizado en toda Europa para la construcción de diques en los puertos en la segunda mitad del siglo XIX, pero las buenas prestaciones y mayor economía de los diques contruidos con cajones de hormigón armado hicieron desaparecer prácticamente los sistemas de construcción concertados.

En España, con anterioridad al proyecto de Bellido, se habían realizado estudios del uso de este tipo de construcción en el puerto de refugio de Asturias por parte del ingeniero Don Salustio González Regueral (Puerto de Gijón, 2005). A diferencia del sistema empleado en Tarragona, se propone realizar las tongadas de hormigón cada dos hiladas de escollera, siendo esta de grandes dimensiones.

A fecha del proyecto del dique de Oeste de Tarragona de Bellido, en Bilbao se estaba realizando la ampliación de la Ría utilizando un sistema concertado similar al descrito (Churruca, 1882), rellenoando todo el hueco intermedio con hormigón hidráulico en vez de mampostería como se propone en Tarragona.

3.5. Estado actual de las obras

Se puede comprobar in-situ como los muelles proyectados por Bellido fueron ejecutados mediante el sistema de construcción con hormigón en masa sumergido fresco, pues no existen juntas en los muros de los muelles estudiados.

Pasados más de 100 años desde su construcción, se puede concluir que el estado general de la obra es relativamente bueno, se hace notable el desgaste del hormigón debido a la erosión producida por el oleaje, con zonas cuyo desgaste llega a ser cercano a los 15 centímetros según estimaciones visuales. El estado actual de la cimentación construida con el sistema anteriormente explicado se puede observar en la *Figura 14*:



Figura 14. Estado actual del muelle de Levante (fuente propia).

La erosión del hormigón (*Figura 15*) pone de manifiesto la composición pétreo de éste, pudiéndose observar el uso de piedra machacada de gran tamaño y angulosidad en su fabricación, destacar también la baja proporción de ligante, pero suficiente para su propósito.



Figura 15. Detalle del estado actual del hormigón utilizado (fuente propia).

En la *Figura 16* se muestra la distribución actual del puerto de Tarragona y se enmarca en rojo las obras de los muelles de Costa y de Levante construidos mediante el sistema de hormigón sumergido explicado:



Figura 16. Configuración actual del puerto de Tarragona. Señalada la obra descrita (Google Maps).

Capítulo 4: Comienzos del s. XX, auge en el uso de cajones. Experiencias en los puertos de Bilbao y Barcelona

4.1. Introducción

La creciente actividad económica desarrollada en los puertos a finales del siglo XIX provoca que tengan que ganar terreno al mar, para satisfacer esta necesidad se requieren obras cada vez de mayor envergadura, siendo los medios técnicos para ejecutarlas limitados. Los ingenieros de la época encuentran la solución a estos problemas en el uso de cajones con fondo, fáciles de construir, de transportar y con la capacidad resistente necesaria para soportar los temporales del mar.

Es conocido el intento de los ingenieros militares españoles por utilizar cajones de madera (Cámara, 2005. *Figura 17*) en la construcción de muelles durante los siglos XVII y XVIII, cajones que se rellenaban de piedra ligada con cales hidráulicas para dar consistencia a la construcción, pero el resultado de utilizar este tipo de construcción siempre fallaba por problemas en la cimentación.

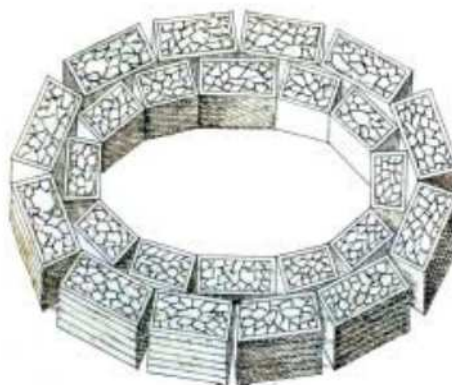


Figura 17. Cajones de madera del ingeniero-inventor Juanelo Turriano del siglo XVI (Cámara, 2005).

Los primeros usos en el panorama internacional del hormigón armado en cajones, utilizados para la construcción de diques verticales, se realizan a finales del siglo XIX en los puertos de Zeebrugge (Bélgica, 1895) y de Bizerta (Túnez) con notable éxito (Puerto de Barcelona, 1905). Sin embargo, no es de estos puertos donde el ingeniero Carlos de Angulo toma la mayoría de ideas para realizar la ampliación del dique de abrigo del puerto de Barcelona, donde por primera vez en España se utiliza el hormigón armado en obras marítimas exteriores, sino que se basa en la construcción llevada a cabo pocos años antes por el ingeniero vasco Evaristo Churruca en el puerto de Bilbao.

4.2. Cajones metálicos (Dique del Oeste del puerto de Bilbao)

4.2.1. Definición de la obra

En 1877 se conforma la Junta de Obras del Puerto de Bilbao, con el ingeniero Evaristo de Churruca y Brunet (*Figura 18*) como director. El primer estudio que llevó a cabo como director de la Junta estuvo dirigido a averiguar si era posible un proyecto para hacer más navegable la ría de Bilbao, pues hasta entonces solo era accesible a buques de eslora corta, lo cual obligaba a los buques a fondear a varios kilómetros de Bilbao y a transportar la mercancía en gabarras, encareciendo todo el proceso. En una época de expansión industrial y mercantil, en que la industria siderúrgica vasca tenía una gran importancia internacional y una inestimable necesidad de transporte de minerales, las condiciones descritas del puerto eran perjudiciales para el comercio y la industria.

Evaristo de Churruca y Brunet (Izu, Navarra, 26 de octubre de 1841 – Bilbao, 3 de abril de 1917) descendente de un ilustre linaje, en 1863 acabó de cursar brillantemente la carrera de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos en Madrid, posteriormente fue destinado a Murcia, al servicio marítimo de puertos y faros de esta provincia, donde dirigió varias obras. En 1865, fue trasladado a Valencia para estudiar las inundaciones del río Júcar. En los 6 años que estuvo en Puerto Rico, adquirió gran parte de su experiencia profesional que le servirían para proyectar el Puerto Exterior de Bilbao, allí hizo numerosos estudios sobre la mejora del puerto de San Juan.



Figura 18. Retrato y estatua en honor de Evaristo Churruca (www.euskomedia.org, 08-02-2012).

En su regreso a España, trabajó durante varios años para la sección de carreteras y ferrocarriles de la Junta Consultiva de Caminos, Canales y Puertos, hasta que en 1877 se hizo cargo de la dirección de la Junta de Obras del Puerto de Bilbao. Trabajó en secreto en la idea del puerto exterior en el Abra de Bilbao (*Figura 19*), hasta que consiguió el suficiente apoyo económico para llevarse a cabo. La importancia de la obra fue tal que la primera piedra la colocó en 1888 el Ministro de Fomento y la última, el Rey Alfonso XIII, en septiembre de 1902. En la actualidad, da nombre a una plaza de Getxo, en las proximidades de las obras que ejecutó, donde se encuentra una estatua construida en su honor.

El proyecto de construcción del dique de oeste en el Abra de Bilbao fue aprobado por Real orden de 29 de junio de 1888 y adjudicado el 25 de octubre de ese mismo año. Este

banqueta, causando graves averías durante dos inviernos consecutivos, obligando a estudiar a los ingenieros responsables un nuevo sistema de construcción para la superestructura.

Además, el sistema que se estaba utilizando para la construcción del dique requería el uso de buzos de forma intensiva, pero el número de días en el que se podía trabajar con buzos era muy corto, aumentando notablemente el periodo de finalización de las obras.

Las propuestas realizadas por Evaristo Churruca para solucionar estos problemas existentes y acelerar el proceso de construcción del dique fueron:

1. Utilizar como defensa exterior el basamento mixto de escolleras y bloques artificiales que estaba construido en su mayor parte y debía terminarse como en el proyecto primitivo.
2. Ensanchar 40 metros hacia el interior del puerto el cuerpo inferior de escollera del basamento.
3. Construir la superestructura sobre esta escollera, previamente enrasada a nivel de 5 metros debajo de bajamar equinoccial, y empleando en sus fundaciones grandes cajones de hierro, de 13 metros de longitud, 7 metros de anchura y 7 metros de altura, macizados con hormigón (ver *Figura 20*).

Entre los ejes de la nueva superestructura y el de la antigua habría una distancia de 47,60 metros, quedando así 30 metros de anchura entre el paramento exterior de la nueva y el borde interior del basamento de bloques de defensa, pudiendo así amortiguar en esta distancia la fuerza de las olas que llegarían a incidir en la nueva superestructura.

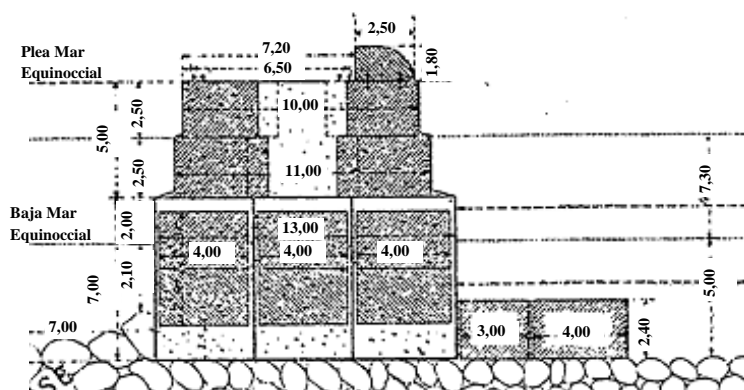


Figura 20. Perfil del dique del Oeste (Churruca, 1897).

Comparativamente con el sistema concertado propuesto en el primer proyecto, por cada metro cúbico de hormigón para los bloques se utilizarían únicamente 44 kilogramos de hierro, reduciendo sustancialmente el coste de la maquinaria para mover las piezas.

Como es lógico, se esperaba que la acción del mar provocase con el tiempo la oxidación del paramento exterior de hierro sin afectar a la resistencia global del dique, pues quedaría la fundación formada por los enormes monolitos de hormigón, cuya resistencia sería superior que la de los sistemas concertados habitualmente empleados hasta la fecha.

4.2.2. Materiales

El hormigón para lastrar el cajón de hierro y el hormigón para hacer el relleno final del cajón se compone de 250 kilogramos de cemento Portland de Boulogne por metro cúbico de hormigón, además de la arena y piedra correspondiente, mientras que el hormigón utilizado en los bloques de hormigón que se introducen en los cajones tienen la proporción de 200 kilogramos de este cemento por cada metro cúbico de hormigón.

Si hoy en día se planteara la construcción de un dique con este sistema de construcción, teniendo en cuenta las exigencias marcadas por la normativa EHE-08 para una clase de exposición IIIb+Qb, el coste exclusivamente de materiales, utilizando chapa de acero de 10 milímetros de espesor y despreciando el valor de armadura mínima con la que se tendría que armar el hormigón de lastrado y de relleno, sería el que se muestra en la *Tabla 9*:

Tabla 9. Coste actual de los materiales de fabricación de este tipo de cajones.

Material	Unidades	Precio unidad BEDEC, 2012 (€)	Coste (€)
Plancha de acero S235JR (kg)	29123,5	1,04	30.288,44
Hormigón HA-30/B/20/IIIb+Qb de lastrado (m ³)	136,5	95,05	12.974,33
Bloque prefabricado de HA para muelles de 15 tn (m ³)	455	71,31	32.446,05
Hormigón HA-30/B/20/IIIb+Qb de relleno (m ³)	45,5	95,05	4.324,78
TOTAL			80.033,59

Si la construcción de estos 637 m³ de cajón se realizara mediante un cajón prefabricado de hormigón armado (134,43 €/m³) el coste total del cajón de estas dimensiones sería de 85.631,91 euros (materiales y coste de fabricación, sin poner en obra), con lo que el coste de fabricación del cajón de acero propuesto debería de ser inferior a 5.600 euros para ser competitivo económicamente con respecto al de hormigón armado.

La viabilidad de este tipo de cajón no únicamente vendría ligada a la economía, sino también a los problemas medioambientales que puede generar la corrosión del acero ante el ataque del agua del mar y el impacto visual que ocasionaría la descomposición del acero con el tiempo.

4.2.3. Método constructivo

Los cajones metálicos se construían en el taller de Axpe, cercano a las dársenas del puerto de Bilbao, una vez lanzado al agua se procedía a rellenarlos hasta 1,50 metros de altura con una tongada de hormigón. Posteriormente, el cajón era remolcado a pie de obra y se presentaba en la posición que tenía que ocupar, poniéndolo en contacto con el cajón anterior y se alineaba lo mejor posible. Bien ubicado y con una cierta estabilidad, el cajón se llenaba de agua mediante una bomba centrífuga y una pequeña compuerta hasta que quedase bien asentado sobre la base de escollera, que se enrasaba previamente con una campana de buzo.

Pese a estar reforzado el cajón metálico con una celosía longitudinal en toda su altura y dos transversales que dividían el cajón en 6 secciones, se debía macizar el cajón con la mayor rapidez porque en caso de que el mar se llegara a picar lo destruiría fácilmente. Los bloques artificiales utilizados en el relleno del cajón tenían 4 metros de longitud, 3 metros de anchura y 2,50 metros de altura. Se colocaban en el interior del cajón mediante una grúa Titan que avanzaba con el dique gracias a la colocación de unos raíles móviles. En la *Figura 21* puede verse una reproducción de la grúa deslizante que se utilizaba en esta obra.

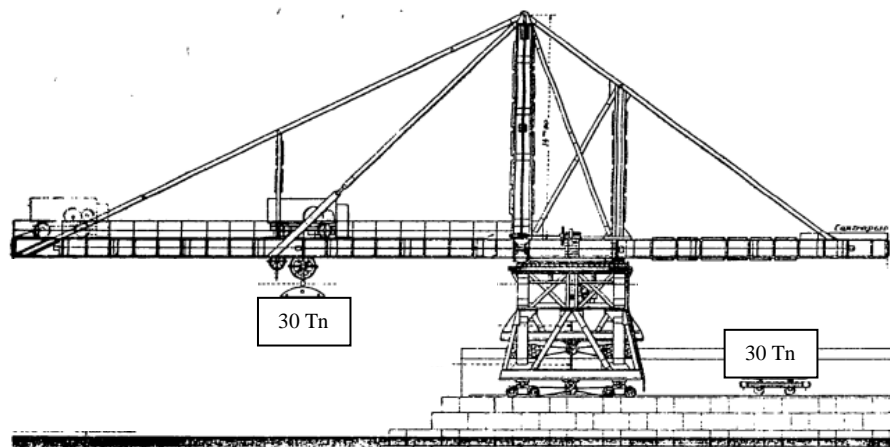


Figura 21. Reproducción de la grúa deslizante para posicionar los bloques de hormigón (Churruca, 1897).

Con dos hiladas de estos bloques y la tongada de hormigón se llegaba hasta los 6,50 metros de altura de los 7 metros del cajón, este espacio y los huecos existentes entre los bloques artificiales se rellenaban con hormigón de cemento Portland, formando así un conjunto monolítico de 637 m^3 ($13 \times 7 \times 7 \text{ m}^3$). El relleno de hormigón se efectuaba en seco, achicando con anterioridad el agua contenida en el interior del cajón. Todo el proceso se solía realizar en la bajamar siguiente a la que el cajón se coloca.

Sobre el monolito fabricado, se construía la superestructura correspondiente, formada en sus paramentos por 8 bloques de 30 m^3 cada uno y un relleno de hormigón de fraguado rápido. Una vez asentados bien los bloques se procedía a rellenar las juntas con hormigón hidráulico y a construir el parapeto.

En condiciones de mar en calma, la colocación del cajón de hierro, su macizado interior y la construcción de la superestructura se realizaba en un espacio de tiempo de entre 30 y 32 horas. Este intervalo de tiempo era variable, ya que en caso de alterarse el mar este proceso se paralizaba durante uno o dos días, por estas circunstancias es muy variable el número de cajones que se podía llegar a colocar, habiendo llegado varios meses al máximo de 9 cajones, sin embargo, en otros meses sólo se llegó a las 6 unidades.

En la *Figura 22* se muestra una fotografía del dique del Oeste ya finalizado donde se pueden apreciar las dimensiones del mismo así como su sistema de coronación.

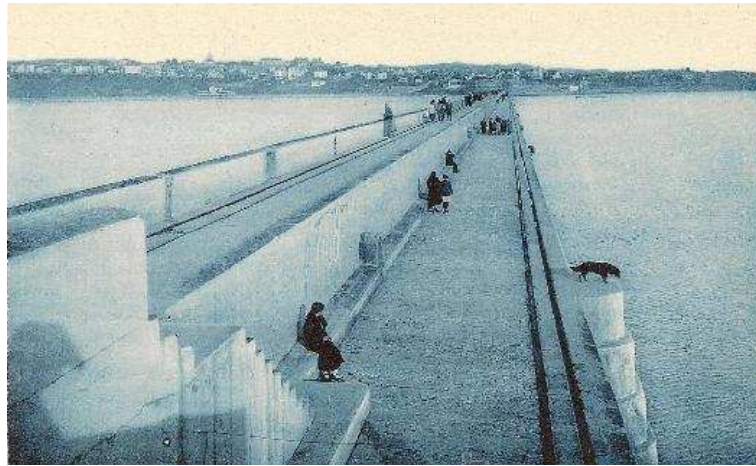


Figura 22. Fotografía de época tomada del dique del Oeste del puerto de Bilbao (www.todocoleccion.net).

Una problemática de este sistema de construcción (Churruga, 1897) se encontraba en la fundación, pues la escollera del basamento inferior tendía a asentar y era difícil estimar cómo se realizaba este asiento en cada sección, siendo la calidad del terreno muy similar a lo largo de la longitud del dique, el asiento seccional era bastante uniforme, siendo de 20 centímetros el descenso acabado de construir el cajón y la superestructura.

Con el peso, las maniobras de la grúa Titán y la acción de los temporales del invierno del año 1901 (ver *Figura 23*), el nivel llegó a bajar otros 40 centímetros aproximadamente, con que cada trozo de dique descendió como término medio un total de 60 centímetros, estabilizándose pasado el primer invierno.



Figura 23. Temporal soportado por el dique del Oeste en 1901 (Ribera, 1925).

La construcción de los 1450 metros de dique rompeolas se llevó a cabo en 8 años, con la velocidad de colocación de bloques que se presenta en la *Tabla 10*:

Tabla 10. Rendimiento de la ejecución de las obras (guaitos.wordpress.com).

Año	Cajones ejecutados
1895	13
1896	25
1897	28
1898	30
1899	30
1900	24
1901	24
1902	18
TOTAL	192

4.2.4. Evolución del sistema

La experiencia de Evaristo Churrua es la primera conocida en el uso de cajones metálicos para la construcción de toda la alineación de un dique. Anteriormente, en escasas ocasiones, se habían utilizado sistemas similares en la construcción del morro de los diques (J.N., 1897), que eran los encargados de soportar los mayores esfuerzos del conjunto de la obra, como fue en el caso del puerto de Madrás (India) de sección circular de 12,81 metros de diámetro y 16,17 metros de altura. El cajón metálico estaba formado por una lámina exterior de hierro de 6 milímetros de grosor y sistema de celosía interno que aumentaba la resistencia del conjunto.

En el año 1901, en Valencia por culpa de un fuerte temporal se produjo una avería en el dique de abrigo del puerto. La solución que propuso el ingeniero jefe Fausto Elías, vistas las buenas cualidades del sistema empleado en Bilbao, consistió en sustituir los bloques averiados por cajones de medidas 8 x 8 x 8 metros contruidos con moldes desmontables de hierro y madera (Ribera, 1925). Gracias a este sistema se podían construir diferentes cajones perdiendo únicamente el fondo del encofrado. Años más tarde, se retiraron los cajones contruidos con este sistema del dique por el temor que había en la época a la descomposición por ataque químico de los hormigones ejecutados con cemento portland que no se habían dejado curar durante un tiempo prudencial.

4.2.5. Estado actual

La morfología del puerto exterior de Bilbao no se vio prácticamente modificada hasta que a partir de 1985 empieza la construcción del dique rompeolas de punta Lucero y el de punta Galea, dando origen al superpuerto actual de Bilbao. Estos diques modificaron el oleaje del puerto exterior de Bilbao, quedando infrautilizada la estructura construida por Churrua. Actualmente, el dique del Oeste da origen a un entramado de muelles.

La configuración del puerto exterior de Bilbao en la actualidad se puede observar en la *Figura 24*.

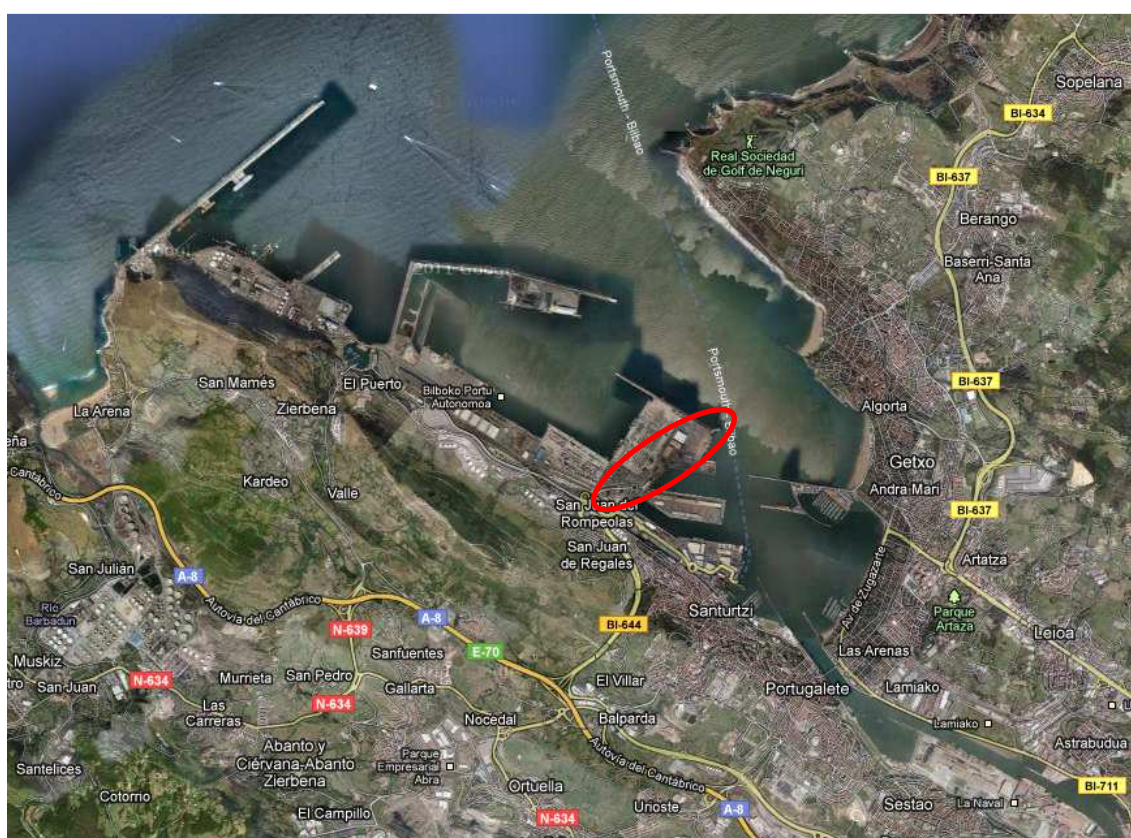


Figura 24. Configuración actual del puerto exterior de Bilbao. Señalada la obra descrita (Google Maps, 2011).

La construcción de los muelles adyacentes, únicamente hace visible el antiguo perfil del dique en los últimos metros del dique y el morro, en la base del centro de Control de Salvamento Marítimo (*Figura 25*) se pueden observar aún los grandes bloques de hormigón que quedan tras la desintegración de los cajones de hierro.



Figura 25. Dique del Oeste como base de la torre de Salvamento Marítimo (www.panoramio.com).

4.3. Cajones de HA (Dique del Este del puerto de Barcelona)

4.3.1. Definición

En el año 1868 se constituye la Junta de Obras del puerto de Barcelona, dirigida inicialmente por el ingeniero Mauricio Garrán. La creación de este organismo hace que las obras de ampliación del puerto de Barcelona se intensifiquen, siendo ejecutadas pocos años después las obras del dique de abrigo de Levante y las del dique transversal del Oeste. En la *Figura 26* se observa la distribución del puerto de Barcelona en 1873.

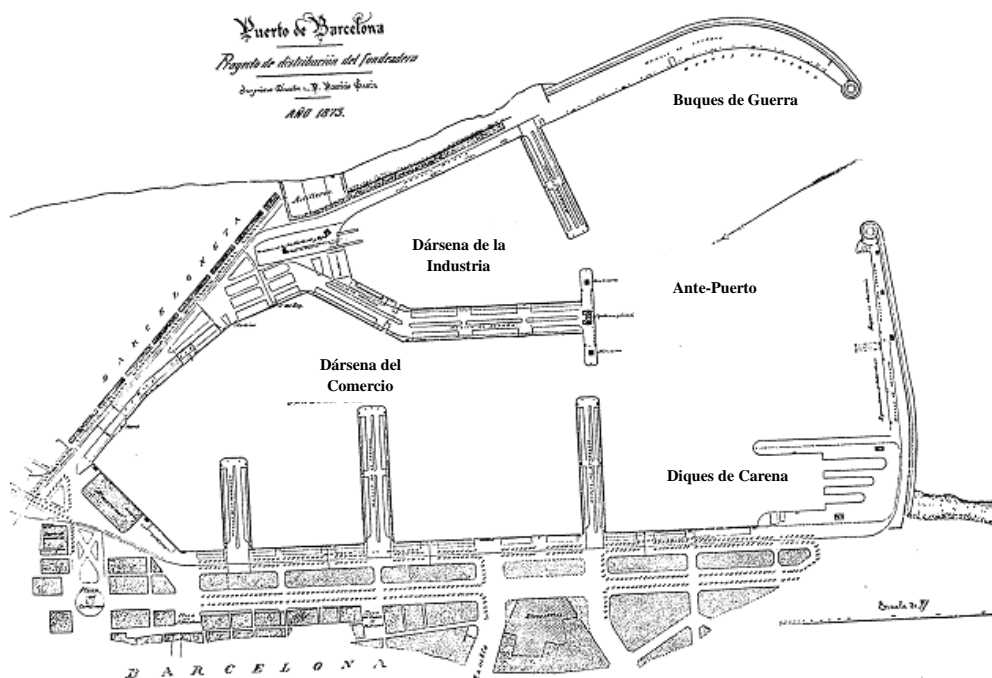


Figura 26. Plano de distribución del puerto de Barcelona en 1873 (Aixelà, 1915).

La distribución del dique de Levante construido por Garrán no resguardaba el fondeadero de los temporales del S y SO, además, la forma curvo-convexa del tramo final favorecía la entrada de las resacas al interior del puerto. Para solucionar esta problemática, ampliar la extensión del puerto y adecuarlo a las crecientes necesidades de tráfico marítimo, se propusieron diferentes estudios de ampliación del dique de Levante, siendo el propuesto por el ingeniero jefe Carlos de Angulo el que finalmente se ejecutó.

Don Carlos de Angulo y Beltrán (Barcelona, 1854-1905. *Figura 27*) se graduó como segundo de diez alumnos de la promoción de 1875 de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. En 1899 toma posesión del cargo de Director de la Junta de Obras del puerto de Barcelona. Su trabajo principal fue el de proyectar la construcción de la prolongación del dique del Éste, también dirigió las obras de nuevos muelles interiores, como por ejemplo, los muelles de España y de Baleares. En el mes de marzo de 1906 fue trágicamente asesinado en su domicilio. Sus proyectos serían ejecutados íntegramente por su sucesor en el cargo, el ingeniero Julio Valdés Humarán.

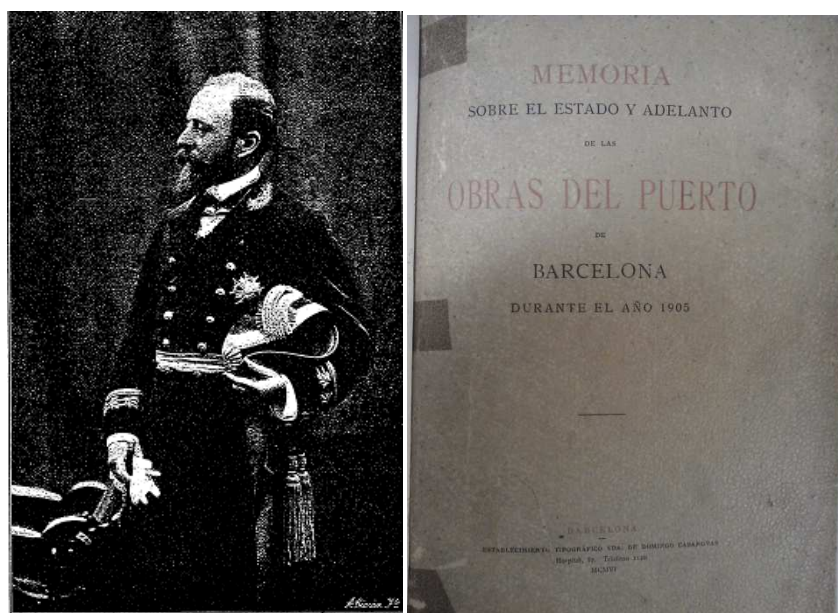


Figura 27. Fotografía de Carlos de Angulo y memorias del puerto de 1905 (Archivo histórico Puerto de Barcelona).

La distribución en planta del dique propuesto por Angulo tenía su inicio en el morro del antiguo dique continuando con una alineación recta cercana a los 1400 metros y un morro de base cuadrada. Este dique (*Figura 28*) permitiría el abrigo directo del antepuerto y las dársenas interiores frente a la mayoría de vientos y mares incidentes;

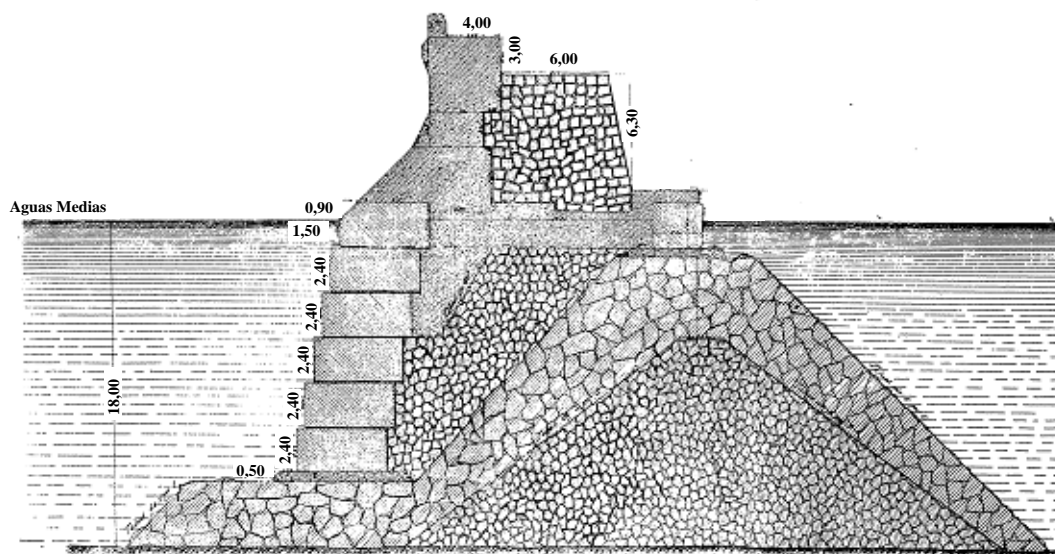
reducir considerablemente los problemas de aterramientos; y ampliar la extensión abrigada que facilitaría las operaciones de carga y descarga de los buques.



Figura 28. Plano de las obras de prolongación del dique de Levante del puerto de Barcelona (Aixelà, 1915).

La primera propuesta de sección transversal para la alineación del dique de Levante, presentada en *Figura 29*, estaba formada por un basamento general de mampuestos, que por el lado exterior se coronaba a 14 metros bajo el nivel del mar y se construía sobre él, previamente preparado con una capa de hormigón, un muro de bloques de 80 toneladas, con un poco de talud, hasta la cota de un metro sobre el agua.

Por el lado interior se recrecía el macizo de escollera y se revestía con otro de escollera gruesa hasta la cota de 2 metros bajo el nivel medio de mar, terminando este lado con un macizo de bloques de hormigón por la parte de fuera y escollera por dentro hasta enrasar sobre el agua, construyendo luego el espaldón, formado también con hormigón por el lado exterior y mampostería por el interno; la coronación del pretil se elevaba a 11,30 metros por encima del nivel medio del mar y el espaldón tenía una anchura de 9,00 metros.



Este proyecto fue aprobado por la Superioridad y se iniciaron las obras de ampliación del dique del Este a finales de agosto de 1900 bajo la problemática necesidad de cantidades extraordinarias de piedra adecuada que no se podían encontrar en las canteras de la ciudad de Barcelona. Finalmente, se explotó una cantera en el Garraf donde se tuvo que construir un puerto para facilitar el transporte por mar de la piedra.

Hasta el año 1903 se estuvo construyendo el puerto del Garraf, vertiendo escollera de base y construyendo los grandes bloques de hormigón. Iniciado el proceso de colocación de los bloques de hormigón sobre la escollera, se encontraron con que no tenían suficientes días la tranquilidad de aguas necesaria para su puesta en obra. Este hecho junto a los fallos de obras similares en otros puertos, como en el dique de Tyne, hizo cambiar el perfil transversal del dique de Levante.

El nuevo perfil propuesto por Carlos de Angulo y aprobado por la Superioridad consistía en un basamento general de escollera de pequeñas dimensiones enrasado a la cota de 9 metros por debajo del nivel de mar, que es la profundidad generalmente admitida en que se cesan las socavaciones o que no tienen las acciones de las corrientes de la marejada sobre las piedras de reducido tamaño; sobre aquel basamento se levantaba un macizo de bloques de hormigón de 80 toneladas arrojados, que sobresalían unos 2 metros, por encima del agua, con el talud correspondiente a cada lado.

Al abrigo de esta restinga de sillares artificiales y subiendo previamente la escollera del basamento hasta la cota de 6 metros, se disponían unos grandes cajones de hormigón

armado de 6 metros de ancho por 7 metros de altura, rebasando, por tanto, un metro del nivel del mar, y que una vez llenos debían de servir de base al espaldón.

El prisma trapecial comprendido entre la restinga de los bloques y la pared lateral de los grandes cajones se rellenaba de escollera de grandes dimensiones coronada por una capa de mampuestos fuera del agua, para recibir una gran tortada de hormigón compuesta de dos banquetas de grandes dimensiones, para desempeñar el papel asignado a los macizos de guarda que tenían que evitar los efectos de las resacas.

El espaldón sobre los grandes cajones rellenos estaba constituido por dos muros de bloques y hormigón entre ellos de 5,00 metros de espesor conjunto, que se reducía a 4,00 metros en su coronación, situado a 8,50 metros sobre el mar. Tanto por el lado exterior como por el del puerto, los taludes de la escollera pequeña eran protegidos por un manto de piedra gruesa como se muestra en la *Figura 30*.

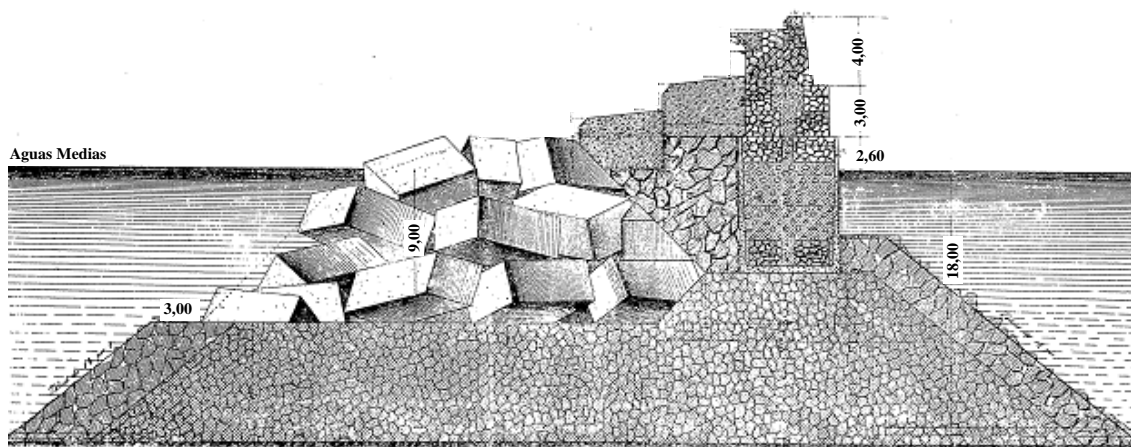


Figura 30. Perfil del dique de Levante utilizando cajones de hormigón armado (Aixelà, 1915).

De este modo el núcleo de bloques arrojados, después de haber proporcionado el abrigo necesario para la colocación y relleno de los grandes cajones, pasaba a formar parte del cuerpo del rompeolas como elemento arrojado, y a su vez los grandes cajones, que no tenían que resistir la violencia del oleaje, quedaban formando la base de la parte concertada con las dimensiones estrictamente necesarias para servir de cimiento al espaldón, siendo la coronación de este de pequeño espesor, porque no tenía que aguantar más que los rociones después de romper el oleaje sobre los bloques, salvar estos y los dos escalones del macizo de guarda, que es el elemento que realmente necesita grandes espesores que garanticen su resistencia a los extraordinarios esfuerzos

producidos por la acción casi directa de las marejadas, por los golpes de ariete y efectos de la resaca.

Las ventajas que se esperaban tener con este nuevo perfil transversal eran las siguientes:

1. El coste de la obra no aumentaría respecto a la del proyecto aprobado, y si en los cajones se lograban reducir costes, sería todavía menor de lo previsto en el presupuesto.
2. El macizo o restinga de grandes bloques artificiales tendría mejores condiciones de resistencia y estabilidad que el muro concertado, y en caso de producirse algún asiento por socavación de la escollera de su base o por los movimientos de las marejadas, podría reponerse fácilmente el macizo con otros bloques.
3. La construcción de esta restinga, sobre todo en su parte general, podría efectuarse durante casi todo el año, y como su avance y el de su basamento era posible hacerlo con rapidez, quedaría en poco tiempo bastante resguardado el antepuerto.
4. Al abrigo de esta parte arrojada podría realizarse con mayor facilidad el asiento de la obra concertada que había de sostener el espaldón.
5. La profundidad de 6 metros a que se cimentaban los cajones, si bien permitía que todavía existieran socavaciones, estas serían fácilmente evitables vertiendo en seguida a su pie los correspondientes mantos de escollera gruesa.
6. Las averías se reducirían considerablemente, y en caso de haberlas, afectarían a movimientos en el macizo de bloques, de tan poca importancia como fáciles de remediar.

Sistemas similares de construcción se emplearon en Bilbao, con los cajones metálicos, en los diques verticales del puerto belga de Zeebrugge o en el francés de Bizerta, considerándose sistemas de construcción muy seguros y de rápida ejecución. De adoptar estos sistemas tal y como se conocía habrían sido necesaria la construcción de cajones de hormigón armado de más de 16 metros de altura apoyados directamente sobre el fondo o un basamento de hormigón, que representarían unas enormes dificultades técnicas y económicas e imposible de ejecutar en un puerto sin mareas y con los calados del de Barcelona. Por estas razones, se optó por el sistema explicado con anterioridad.

En el proyecto inicial se describe que tras analizar los esfuerzos del oleaje sobre la estructura y los medios de que se disponían, las dimensiones de estos cajones debían ser de 10 metros de longitud, 6 metros de anchura y 7 metros de altura. La longitud de éste se dedujo para que el elemento fuera de fácil construcción, transporte, colocación en obra y que no se emplease mucho tiempo en su relleno; la altura se calculó para que una vez asentado sobresaliera un poco del nivel del mar, a fin de hacer la construcción interior con total comodidad. La anchura resultaba de la resistencia que debía tener al empuje de las marejadas. El cajón se dividía en varias celdas de 3 metros, y para resistir a los esfuerzos que debía de soportar el cajón se pensaba armar con hierros las paredes de los testeros y parte del fondo. En la *figura 31* se puede observar el interior de uno de estos cajones.



Figura 31. Interior de un cajón de hormigón armado (Archivo histórico Puerto de Barcelona).

La construcción de los grandes bloques de hormigón tenía un claro objetivo marcado por el Centro Superior, la reducción de la cantidad de hierro, llegando incluso a suprimirlo si fuera posible, además de intentar aumentar la longitud del cajón conservando la altura y anchura citadas.

El ensayo del primer cajón fabricado sobre los careneros de la dársena del dique flotante tenía unas dimensiones de 11,60 metros de longitud, 6,00 metros de anchura y 7,00 metros de altura, se armó con hierro las paredes de los testeros y el fondo, se procedió a su botadura por medio del dique flotante, transportado por un remolcador, colocado en obra tras dejar entrar en su interior el agua necesaria, para posteriormente rellenar con

pedra de lastre y en seco hormigonar las celdas interiores. No se observó durante todo el proceso el más mínimo fallo en la estructura (Angulo, 1905).

La cantidad y dimensiones de la armadura se calcularon en base a los procedimientos marcados por las patentes de Hennebique, tratando cada una de las superficies armadas como una viga biapoyada (Valdés, 1907). La buena respuesta de la estructura permitió ir prolongando los cajones paulatinamente hasta llegar, en los últimos tramos del dique, a una altura de 7,80 metros, una anchura de 6 metros y una longitud de 25,20 metros distribuidos en 11 celdas, como se puede comprobar en la sección presentada en la *Figura 32*:

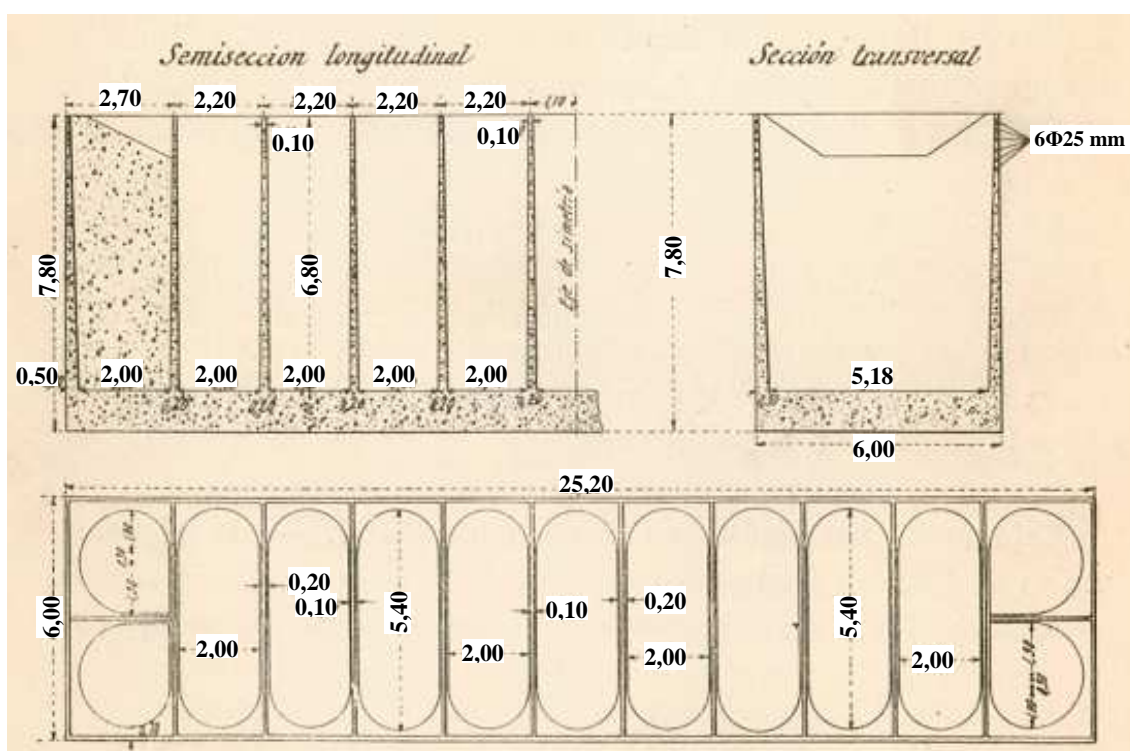


Figura 32. Plano detallado de los cajones utilizados en los últimos tramos del dique (Ribera, 1925).

4.3.2. Materiales

El hormigón con que se formaban los cajones y bloques del dique se fabricaba con cemento portland de fraguado lento de calidad superior, con una dosificación por metro cúbico de: 300 kilogramos de cemento, 0,80 metros cúbicos de gravilla y 0,45 metros cúbicos de arena. Para las paredes y tabiques intermedios se aumentaba la cantidad de cemento portland hasta los 400 kilogramos por metro cúbico, manteniendo las

proporciones de gravilla y arena. En ambos casos, la cantidad de agua a utilizar solía ser en peso la mitad del volumen del cemento.

Las paredes de los cajones no resultaban completamente impermeables debido a las presiones hidrostáticas a las que estaban sometidas, por ello, se enlucían con mortero de cemento y arena fina o bien se realizaba un encalado de tres capas rellenando previamente con cemento los huecos que quedaban. Estos sistemas no evitaban por completo las filtraciones pero sí conseguían que fuera muy poca el agua que entraba en el cajón durante las operaciones de inmersión y transporte hasta su colocación.

El hormigón en bloques se componía por metro cúbico de 200 kilogramos de cal hidráulica, 0,90 metros cúbicos de piedra machacada, 0,50 metros cúbicos de arena y entre 90 y 110 litros de agua.

El mortero utilizado para rellenar los huecos de lastre se componía de una parte en volumen por dos de arena fina y un poco más de agua de la necesaria. El hormigón del relleno del cajón se realizaba por metro cúbico de 175 kilogramos de cal hidráulica, 0,90 metros cúbicos de piedra machacada y 0,50 metros cúbicos de arena.

El coste por metro lineal de estructura detallado se muestra en la *Tabla 11*, donde destaca la poca cantidad armadura utilizada en la obra:

Tabla 11. Coste detallado del metro lineal de dique de Levante.

Unidades	Concepto	Precio en pesetas de 1914	Precio actualizado a euros de 2012⁵
500,75	m ³ de escollera de mampuestos vertida	2.253,37	4.943,89
138,05	m ³ de escollera gruesa vertida	1.049,18	2.301,90
5,00	m ³ de escollera de mampuestos colocada	30,00	65,82
106,03	m ³ de escollera gruesa colocada	964,87	2.116,92
146,47	m ³ de hormigón con cal hidráulica en bloques contruidos y vertidos en obra	2.894,35	6.350,20
1,00	metro lineal de arreglo de la base de escollera para asiento de grandes cajones bloques	19,00	41,69
1,00	metro lineal de gran cajón-bloque relleno	1.403,72	3.079,76

⁵ 1 peseta de 1914 = 2,194 euros de 2012 (Elaboración a partir de Carreras, 2005)

Unidades	Concepto	Precio en pesetas de 1914	Precio actualizado a euros de 2012 ⁵
32,55	m ³ de hormigón con cemento portland extra en los banquetes exteriores	699,82	1.535,41
9,00	m ³ de hormigón con cemento portland extra en la tortada sobre los grandes cajones	193,50	424,54
23,60	m ³ de hormigón con cal hidráulica en espaldón	407,10	893,18
5,52	m ³ de hormigón con cemento portland extra en los pretiles y coronación del espaldón	118,68	260,38
693,36	kilogramos de hierro fundido en placas de suspensión de los bloques arrojados	180,27	395,51
10,00	kilogramos de hierro laminado en varillas y flejes de refuerzo en válvulas y coronación de los grandes cajones	2,60	5,70
	TOTAL	10.216,46	22.414,91

Para comprobar la importancia económica de las diferentes partes del dique se ha elaborado el gráfico representado en la *figura 33*.

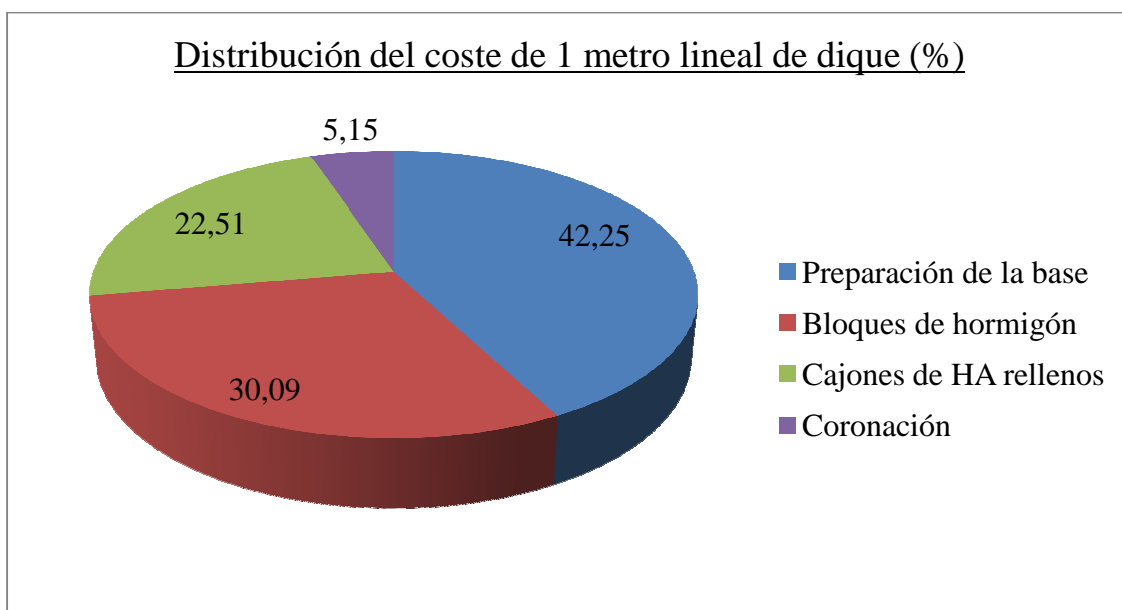


Figura 33. Distribución del coste de 1 metro lineal de dique (%).

Se comprueba el gran peso que tiene la parte de la obra ejecutada con escollera para formar la base de asiento de los cajones y los bloques de hormigón. Al necesitar cubrir calados cada vez mayores, los ingenieros se encuentran con la problemática del aumento del material necesario para resolver los diques con escollera, por ello, con posterioridad, se estandariza el uso de diques verticales de cajones de hormigón armado que su coste es prácticamente independiente del aumento de calado. En el caso

estudiado de Barcelona, el uso de los cajones de hormigón armado sobre esta escollera consigue reducir el coste total del primer perfil considerado.

4.3.3. Método constructivo

Con la mayor parte del basamento de escollera vertida por las grúas flotantes, se procedía a construir los grandes bloques que actuarían como rompeolas. Los bloques de hormigón de 80 toneladas y dimensiones 5,00 x 2,80 x 2,50 metros se construían en un taller ubicado en el muelle de Cataluña, con los equipos necesarios para fabricarlos, secarlos y transportarlos a través de un sistema de raíles.

La mezcla se realizaba en la hormigonera con la dosificación anteriormente citada y se vertía en el interior de unos moldes especiales de palastros que tenían una mayor durabilidad que los de madera. La grúa Goliat (ver *Figura 34*) se encargaba de transportar el bloque hasta el secadero de bloques. Transcurrido el tiempo de secado se cargaba el bloque en una cabria flotante que era remolcada hasta el punto de hundimiento, donde una barcaza adaptada ayudaba a lanzar los bloques.



Figura 34. Grúa Goliat y cabria flotante (Archivo histórico Puerto de Barcelona).

La construcción de los grandes cajones (*Figura 35*) de hormigón armado se realizó en el dique flotante que la autoridad portuaria disponía para la reparación de buques, así se conseguía una rápida y económica botadura, además de disminuir las tensiones en el cajón reduciendo el armado necesario en cada cajón. Se tuvo que ampliar este dique flotante para dar cabida a dos cajones cuya construcción se realizaba prácticamente de forma simultánea, consiguiendo así una mayor rapidez en el desempeño de la obra.

El andamiaje disponía longitudinalmente de unos elementos de encofrado de madera corredizos para dar servicio a los dos cajones, mientras que los elementos transversales, así como los interiores, se ubicaban gracias a un puente grúa. Una vez colocados los encofrados exteriores se hormigonaba el fondo del cajón con 1 metro de espesor mediante tongadas de 25 centímetros.

Posteriormente, se colocaban los tambores o núcleos internos reutilizables que daban origen a las celdas interiores de los cajones, realizando el hormigonado mediante la elevación y posterior vertido gracias al puente grúa. El primer molde que se colocaba solo tenía una altura de 0,40 metros, mientras que los siguientes eran de 1,12 metros cada uno.

A partir de la altura de 5 metros hasta la coronación, se colocaban por paramento siete varillas metálicas intercaladas de 16 milímetros de diámetro las seis primeras y de 18 milímetros la última situada a unos 20 centímetros del borde.

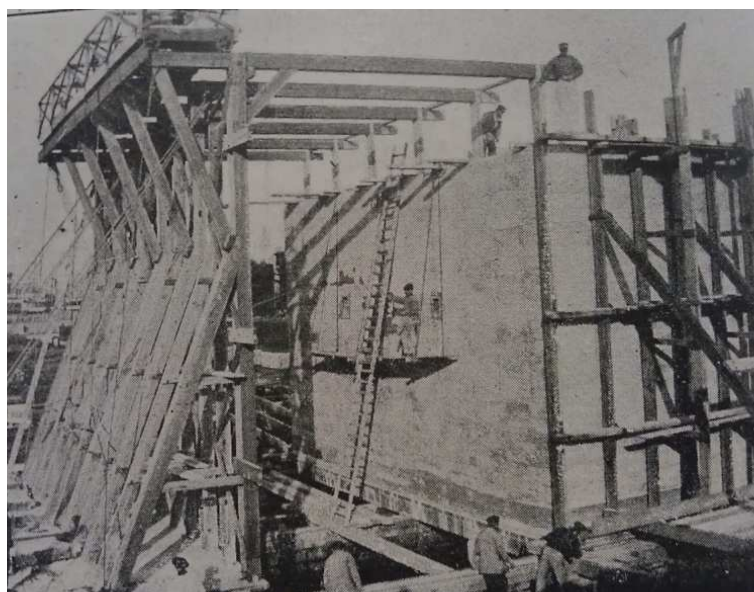


Figura 35. Construcción de un cajón en el dique flotante (Archivo histórico Puerto de Barcelona).

En la construcción de los últimos cajones de dimensiones 25,20 x 6,00 x 7,80 metros se invertían aproximadamente unos 6 días, empleando un total de 326 metros cúbicos de hormigón. A los cinco días de terminar la construcción del cajón se procedía al desmolde de las celdas interiores y finalmente se desencofraban las paredes, a su vez se iban colocando los encofrados retirados en la posición adecuada para fabricar un nuevo cajón.

Construido el cajón se dejaba en el secadero, acondicionado en el propio dique flotante, entre 25 y 30 días, dependiendo de la estación, para que el hormigón adquiriese la resistencia suficiente para soportar los esfuerzos en las diferentes maniobras anteriores a su relleno en el rompeolas.

La botadura del cajón, como se observa en la *Figura 36*, se realizaba de la misma forma que cualquier embarcación reparada, elevando lateralmente la plataforma sobre la que se había construido el cajón este se ponía a flote. El calado aproximado que alcanzaban los cajones era de 5,20 metros.

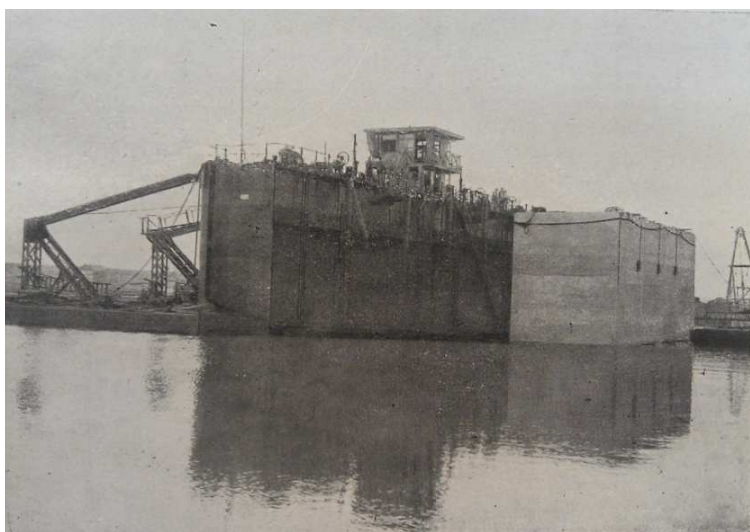


Figura 36. Cajón levantado por el dique flotante para ser botado (Archivo histórico Puerto de Barcelona).

Si las condiciones climatológicas lo permitían, se transportaba directamente hasta su posición en el dique, mientras que si las condiciones eran adversas se llevaban los cajones a un recinto de refugio que se había adecuado para tal fin en el mismo puerto de comercio y que llegaba a dar cabida a 10 cajones.

Un remolcador trasladaba el bloque hasta su emplazamiento (*Figura 37*), alineado con los anteriores gracias a un sistema de cables, quedando la explanada enrasada de escollera a 80 centímetros del fondo del cajón. Se procedía con cuidado a la inmersión del cajón, dejando entrar el agua de forma simultánea en todos los compartimentos gracias a un sistema de válvulas y compuertas situadas en las paredes interiores.

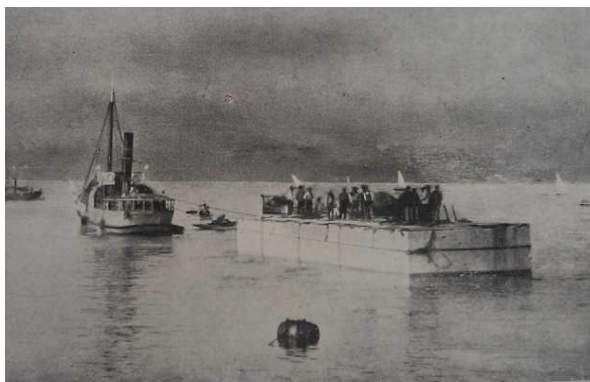


Figura 37. Transporte del cajón por un remolcador (Archivo histórico Puerto de Barcelona).

El relleno con fábrica de hormigón debía realizarse en seco para conseguir una mayor solidez del conjunto. Para el lastrado del cajón se rellenaban las celdas con piedra pequeña hasta una altura de 1,40 o 1,50 metros, dependiendo de la situación de cada bloque. Posteriormente, se achicaba el agua mediante una bomba y se vertía el mortero hasta rellenar todos los huecos de las piedras de lastre.

Con el cajón bien asentado en la subestructura, se disponía a rellenar las celdas con hormigón de cemento portland hasta la coronación. El hormigonado se realizaba por tongadas y se tenía la precaución de empezar por las celdas centrales, acabando por las de los extremos, ya que así las paredes no sufrían esfuerzos anormales de tracción en la testa de las paredes.

Las tareas de transporte, colocación, asiento y relleno de los cajones de hormigón armado se realizaba habitualmente en unos 6 o 7 días. Finalmente, se obtenía una pieza monolítica de 1179,36 metros cúbicos y un peso de 2770 toneladas. Se concluía la obra con la construcción del espaldón y la coronación sobre los cajones de hormigón armado.

Durante la construcción del dique se pudo comprobar in-situ la resistencia ofrecida por la estructura, pues en mayo del año 1910 (*Figura 38*) un fuerte temporal asoló la zona y únicamente causó pequeños destrozos en los últimos tramos que se estaban construyendo (Aixelà, 1915).



Figura 38. Temporal de 1910 soportado por el dique de Levante (Archivo histórico Puerto de Barcelona).

4.3.4. Evolución del sistema en otros puertos

Los buenos resultados obtenidos en el puerto de Barcelona con el uso de cajones de hormigón armado hace que en otros puertos estatales se planteen la utilización de sistemas similares, ya sea en la construcción de diques rompeolas como en muelles.

Tras Barcelona, en España, el primer puerto en utilizar grandes cajones de hormigón armado como estructura de contención en un dique rompeolas es el de Musel, en Gijón. En 1911 se inicia la ampliación del dique del Norte con cajones de medidas en planta de 20,00 x 15,00 x 11,30 metros divididos en 24 celdas interiores, como se muestra en la *Figura 39*. Siendo el armado similar al utilizado en Barcelona, los primeros cajones fueron a pique debido al agua embravecida del Cantábrico que entraba en el interior del cajón y provocaba unas presiones en las paredes para las que no habían sido calculadas.

La solución propuesta que se ofreció por parte del ingeniero (Ribera, 1925) no fue la de aumentar considerablemente el armado de las paredes para resistir estos sobreesfuerzos, sino que se prefirió idear un sistema de defensa en forma de tapa con chimeneas desde donde se realizaba el lastrado y hormigonado del interior de las celdas del cajón.

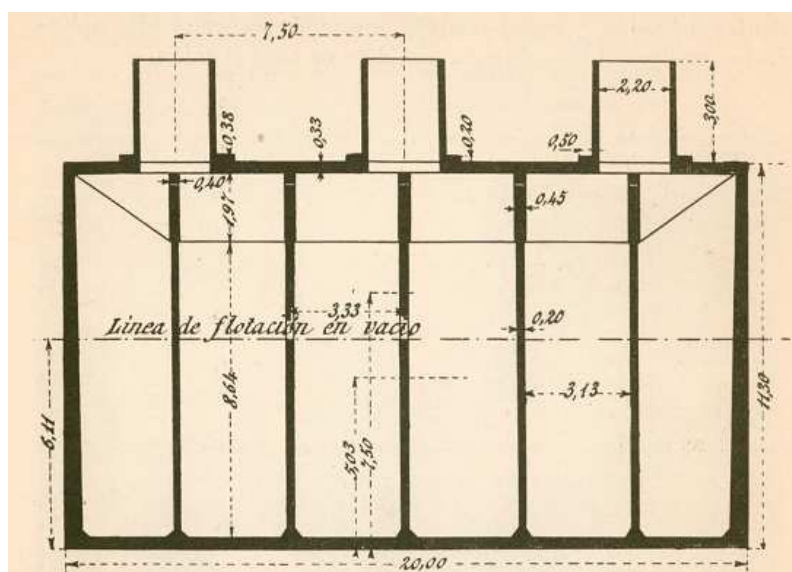


Figura 39. Sección del cajón construido en el dique del Norte del puerto de Gijón (Ribera, 1925).

La publicación en 1911 de los documentos técnicos “Construcciones de hormigón armado” y “Nota de su aplicación en obras hidráulicas” de Juan Manuel de Zafra marca un hito en el cálculo de las estructuras de hormigón armado, pues sirve de referencia para los ingenieros de la época, tanto en construcciones terrestres como marítimas.

Este aumento en el conocimiento del hormigón armado permite un mejor aprovechamiento de las capacidades resistentes del material, como es el caso de los muelles construidos con cajones en la segunda década del siglo XX en Huelva y Santa Cruz de Tenerife (Figura 40), obra dirigida por José Eugenio Ribera.

Se comprueba en las secciones utilizadas en estos cajones un extraordinario aumento en la cantidad de armadura respecto a la utilizada en Barcelona, donde ya no sólo se observan armaduras longitudinales, sino que se empieza a utilizar armadura transversal en el armado de los cajones, formando así un verdadero entramado tridimensional.

Mientras que los cajones de los muelles de Santa Cruz de Tenerife se rellenaban con hormigón de cemento portland como se realizaba en Barcelona, en los muelles de Huelva se utilizó arena en su relleno, sistema más habitual en la actualidad.

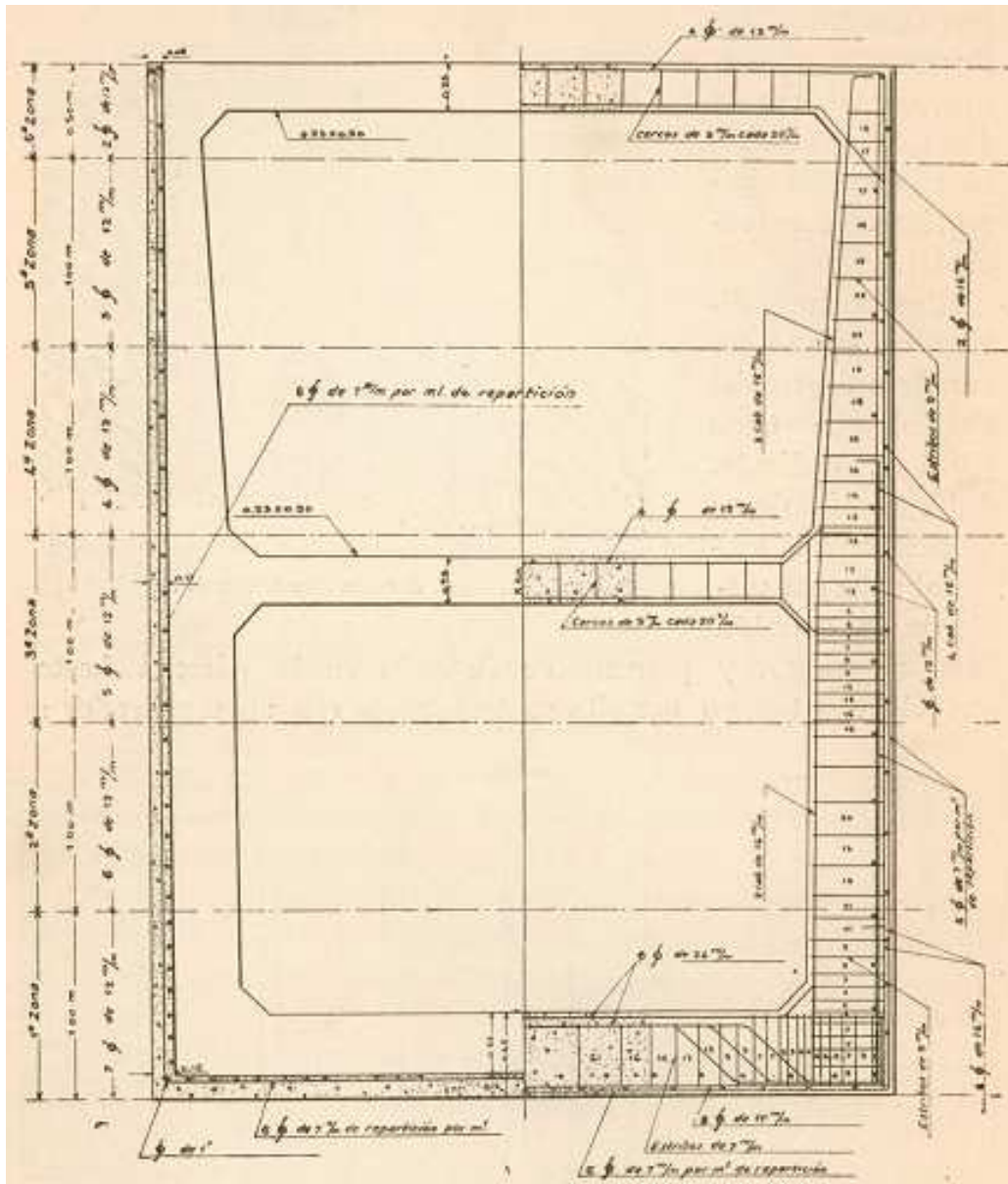


Figura 40. Sección y detalle de armado del cajón utilizado en los muelles de Santa Cruz de Tenerife (Ribera, 1925).

4.3.5. Estado actual

Posterior a la construcción de la prolongación del dique del Este se propone la creación de muelles adyacentes al dique en su lado resguardado, ampliando así la capacidad del puerto de Barcelona, siendo en el año 1945 cuando acaban estas obras. En la *Figura 41* puede verse una vista aérea del puerto de Barcelona.

Actualmente se conoce como “Muelle Adosado” (*Figura 42*) y ofrece amarre a grandes cruceros internacionales. La ejecución de estos muelles ha impedido comprobar el estado de las obras de hormigón descritas en este capítulo.



Figura 41. Configuración actual del puerto de Barcelona, señalada la obra descrita (Google Maps, 2011).



Figura 42. Muelle Adosado al dique del Este (www.panoramio.com).

Capítulo 5: Otras estructuras ejecutadas en hormigón armado

5.1. Introducción

Habiendo visto en los capítulos anteriores el uso que se hacía del hormigón en las principales obras portuarias, este capítulo se centra en el estudio de dos tipos de estructuras diferentes construidas con hormigón armado: los embarcaderos y los barcos contruidos con este material.

La estructura de los embarcaderos se caracteriza por estar diseñada por un tablero trabajando a flexocompresión sujeto por pilares comprimidos bien arriostrados. Los barcos de hormigón armado, sin embargo, tenían que ser diseñados para soportar los esfuerzos dinámicos provocados por la acción de mar.

5.2. Embarcaderos sobre el río Guadalquivir

Como se ha comentado con anterioridad, Juan Manuel de Zafra y Esteban (*ver Figura 43*) fue el principal impulsor teórico del uso del hormigón armado en España. Nacido el año 1862 en Huelva, se graduó en la Escuela de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos como primero de la promoción de 1892, al igual que 26 años antes lo había hecho su padre.

En 1910 fue llamado por la Escuela de Caminos donde, tal y como firmaba sus artículos en la Revista de Obras Públicas, ejerció como profesor de las asignaturas de ‘Puertos y señales marítimas’ y de ‘Construcciones de Hormigón Armado’, asignatura de nueva creación debido a la gran aceptación que estaba teniendo esta técnica constructiva en el panorama estatal. Sus publicaciones técnicas dejan de lado las “recetas” aplicadas hasta entonces para asentar las primeras bases científicas en el cálculo de estructuras de hormigón armado.

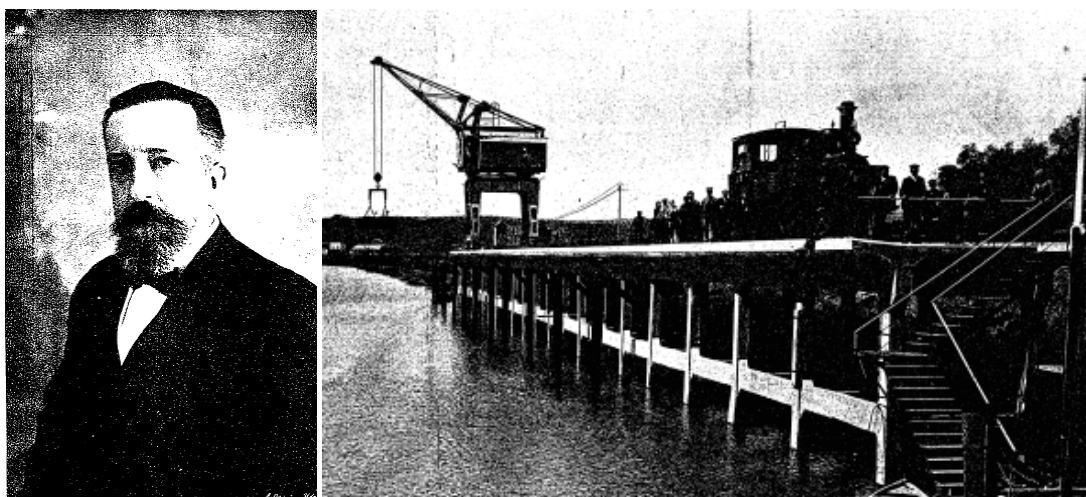


Figura 43. Retrato de Juan Manuel de Zafra y obra analizada (ROP, 1910).

Previo ingreso en la Escuela como profesor, ejecutó diferentes obras como ingeniero responsable del puerto de Sevilla, entre las que destacan los embarcaderos construidos en el río Guadalquivir (Junta de Andalucía, 2007) para dar servicios a las minas de Calas, primera obra ejecutada en hormigón armado en Andalucía calculada según estudios de M. Considère, y Aznalfarache. Pese a la importancia de la primera obra, a continuación se expondrá la construcción del segundo embarcadero, al disponer de una mayor información técnica.

Como se observa en la *Figura 44*, la obra consiste en un embarcadero para el atraque de buques, de hasta 5000 toneladas de porte, a los que una grúa deslizante da servicio cargando o descargando las mercancías en vagonetas. Sobre el embarcadero un sistema de vías permite el movimiento longitudinal tanto de la grúa como de la locomotora y los vagones.

Con un presupuesto del 60% con respecto a un embarcadero metálico de iguales condiciones, Zafra decide realizar la construcción de éste en hormigón armado debidas

la buena respuesta de la estructura similar construida con 5 años de anterioridad en las minas de Calas.

La estructura resistente de la obra consta de un viaducto de 5,30 metros de ancho y 162,50 metros de longitud, construido mediante un forjado continuo de 5,30 metros de anchura y espesor variable y dos nervios de 1,00 metros de altura total, con 3,30 metros entre ejes. Estos reposan sobre unos pilares de 0,36 metros de lado que apoyan en unos pilotes de 0,40 metros de anchura, todo ello construido en hormigón armado. La estructura se arriostra en el sentido longitudinal y transversalmente mediante vigas de atado. El detalle de las secciones transversales se puede ver en la *Figura 44* siguiente:

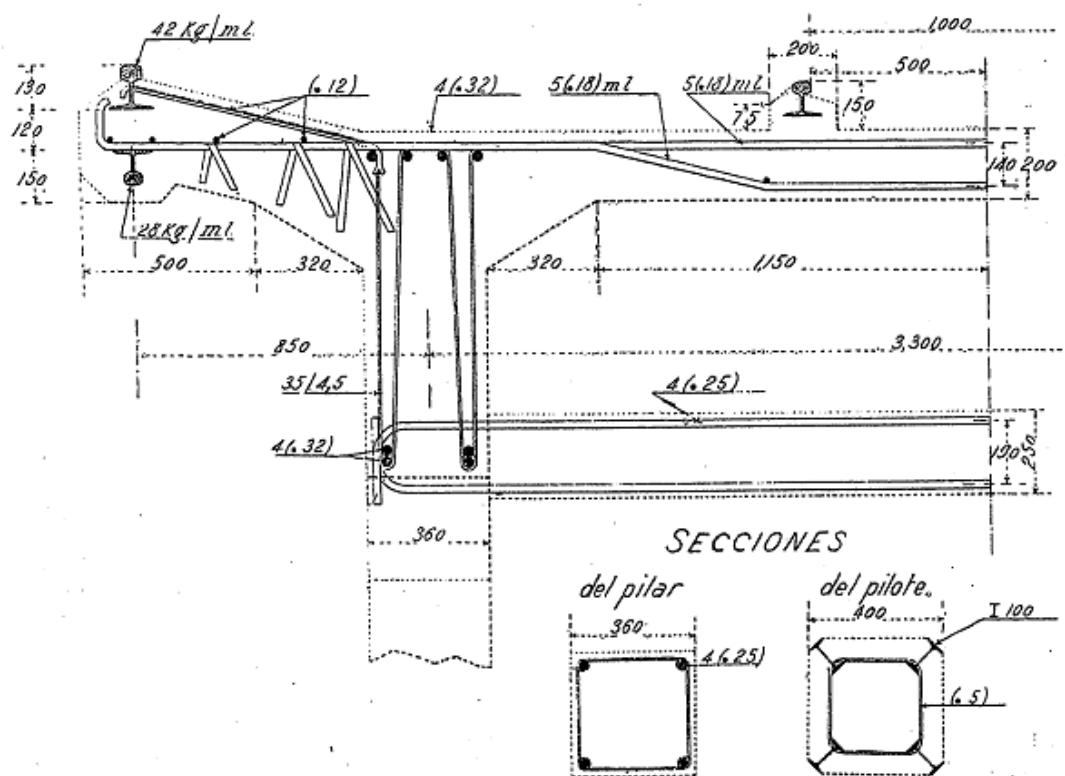


Figura 44. Secciones transversales de las piezas que forman la estructura del embarcadero (Zafra, 1910).

Zafra explica que la disposición en voladizo de la vía de grúas puede parecer una temeridad, pero se justifica con la ejecución de un forjado más sencillo que no soporta las cargas procedentes de las grúas, sino que estas se aplican directamente sobre los nervios, así sucede también con las cargas procedentes de las vías centrales, con lo que la distancia del eje de los nervios a los ejes de las cargas más adecuada será aquella en que los momentos en el empotramiento sean iguales en valor absoluto.

La distribución de sobrecargas aisladas sobre superficies resistentes era un problema de difícil resolución exacta, aunque algo más fácil en estructuras de hormigón armado. Cuando solo existía armadura en una dirección del forjado, la solidaridad de la masa bastaba para que una fuerza aislada se repartiera igualmente sobre una faja cuyo ancho era como mínimo el espesor total del forjado más el del intermedio de transmisión. En este caso particular, las cargas puntuales de los 4 ejes de la locomotora se repartían por igual en más de 4,00 metros de longitud del forjado, mientras que las cargas de la grúa solo alcanzaban una zona de 2,60 metros.

Zafra procede a calcular el armado según sus propias teorías utilizando barras de acero con una resistencia a tracción de 8 kg/mm^2 y a corte de 5 kg/mm^2 . Estas armaduras, colocadas todas en la cara superior en los vuelos del forjado, están alternadas, arriba y abajo, en la parte central; arriostrando correctamente los nervios y contribuyendo a su resistencia. La armadura de los nervios es simétrica, al tratarse de una viga continua de muchos tramos de luz muy corta, 5,50 metros, y no sobre apoyos, sino sobre semiempotramientos.

Los pilotes, de 0,40 metros de lado y 13,20 metros de longitud, están fabricados con 4 perfiles metálicos doble T embebidos en hormigón, formando así una pieza mixta. La elección de este tipo de sección reforzada con perfiles metálicos se debe a los fallos de rotura en el proceso de hincado por un exceso de flexión de pilotes de similares dimensiones en la obra del embarcadero de las minas de Cala, donde se habían armado longitudinalmente con 4 barras de 25,00 milímetros de diámetro atadas por cercos de alambre de 5,00 milímetros cada 0,30 metros. Zafra hace mención que esta rotura se produjo de forma gradual y no brusca, ya que se notaba una marcada estricción en las armaduras, haciendo muestra de la ductilidad del hormigón armado.

El coste total del embarcadero fue de 202.000 pesetas, es decir, 1.243 pesetas por metro lineal. Tras finalizar su construcción se sometió la estructura a pruebas de carga obteniendo unas deformaciones en los voladizos y en los nervios prácticamente inapreciables.

5.3. Barcos de hormigón armado

5.3.1. Marco internacional

La primera embarcación conocida construida en ferrocemento data de 1848, un pequeño bote construido por Joseph-Louis Lambot (*Figura 45*) en el sur de Francia. Posteriormente, este bote fue presentado en la Exposición Universal de París de 1855. Joseph-Louis Lambot fue uno de los precursores del uso del hormigón armado pues ese mismo año publicó el libro “Les bétons agglomérés appliqués á l'art de construire” (Aplicaciones del hormigón al arte de la construcción) y patentó el sistema de construcción de su bote de ferrocemento.



Figura 45. Joseph-Louis Lambot y su bote de ferrocemento (www.mareud.com).

A principios de la década de 1860, en Europa conoce el empleo de gabarras construidas en ferrocemento utilizadas en la navegación por canales. Fue en 1896 cuando el ingeniero italiano Carlos Gabellini aumentó las miras de este sistema y empezó a construir pequeños barcos de este material. Entre 1908 y 1914, fueron construidas barcasas de mayores dimensiones en países como Alemania, el Reino Unido, los Países Bajos, Noruega y en la zona de California, en Estados Unidos.

En agosto de 1917 en Noruega, se establece un hito en el mundo de las embarcaciones de hormigón armado, ya que Nicolay Fougner pone a flote el primer barco de ferrocemento autopropulsado capaz de realizar viajes transoceánicos. Su nombre era Namsenfjord (*Figura 46*) y tenía una eslora de 84 pies (25,60 metros) y un peso de 400 toneladas. A raíz del éxito de este barco, se le ordenó el diseño de otros modelos de buques, incluso en octubre de ese mismo año, Fougner fue contratado por el gobierno

de EE.UU. para liderar un estudio sobre la viabilidad de construir buques de ferrocemento en aquel país.

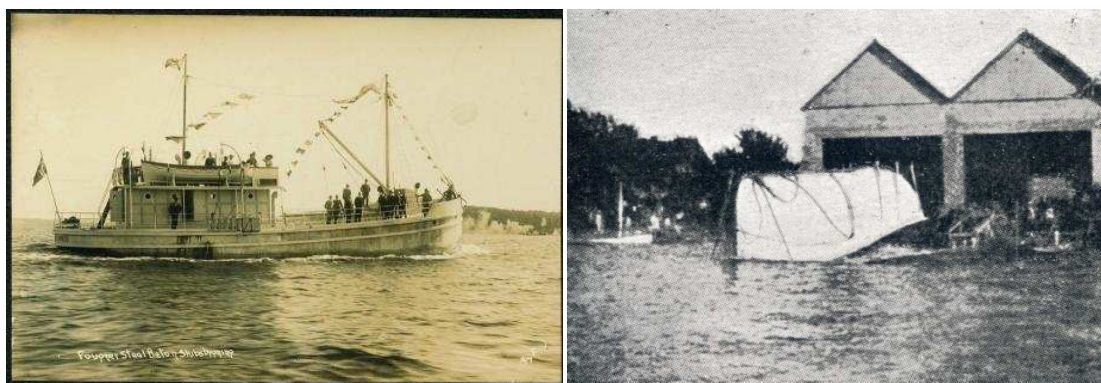


Figura 46. Postal del buque Namsenfjord y proceso de su botadura (www.mareud.com).

Al mismo tiempo, el empresario californiano W. Leslie Comyn tomó la iniciativa de construir barcos de hormigón armado por su cuenta, formó la Ship Building Company y contrató a Alan Macdonald y Victor Poss para diseñar el primer buque americano de hormigón armado y el de más renombre, el SS Faith (*Figura 47*) de 97,54 metros de eslora, 13,56 de manga y 6,86 metros de calado. El SS Faith era un buque destinado al transporte de mercancía a granel, de 6125 toneladas y un coste total de 750000 dólares, que se botó en marzo de 1918.

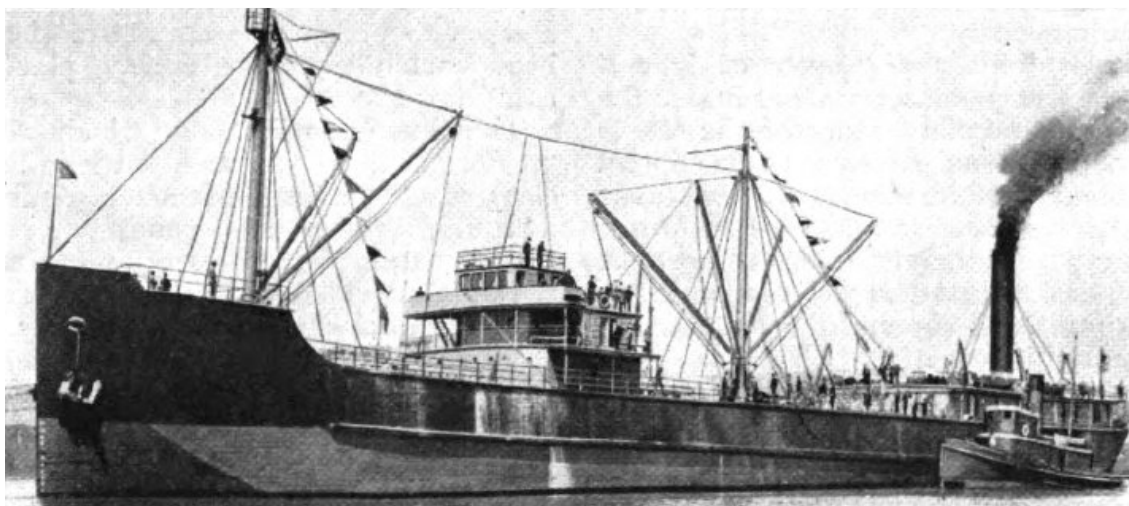


Figura 47. Fotografía del SS Faith (www.wikipedia.com).

El fin de la I Guerra Mundial, y la excepcional situación de necesidad de acero en el ámbito armamentístico, provoca que se dejen de construir barcos de cemento armado en todo el mundo debido a la poca competitividad con los de acero. Una nueva situación excepcional, como es la II Guerra Mundial, rescata este tipo de construcción naval a

gran escala, donde tuvieron una notable importancia en escenarios de renombre como pudo ser el desembarco de Normandía.

5.3.2. Marco estatal

Se conoce la existencia de algunas pequeñas gabarras de cemento armado en las Islas Canarias anteriores a 1918, pero son inexistentes los datos que se tienen de ellas en la actualidad (Sanahuja, 2008). Por el contrario, sí hay documentos que demuestran que los puertos donde se centraba la construcción de embarcaciones de cemento armado en España estaban situados en el País Vasco y Catalunya, concretamente en Bilbao y Barcelona, sin desmerecer el trabajo llevado a cabo en Polanco (Cantabria) con la construcción del Parsy, una embarcación un tanto especial.

Experiencia en Bilbao

Fue en Bilbao donde en 1917 el ingeniero Carmelo Castrillo Olavarria, que posteriormente en 1918 fundaría la Sociedad de Construcciones Navales de Hormigón Armado, quien planteó la construcción de las primeras embarcaciones de hormigón armado (Sanahuja, 2008) de una cierta envergadura en España. El ingeniero Castrillo aportó los derechos sobre las patentes registradas a su nombre y un terreno en la confluencia del Nervión para la construcción de la primera gabarra llamada Catalina. Esta embarcación empezó a construirse el 17 de junio de 1917 y se finalizó en agosto del mismo año, tenía unas dimensiones de 17,00 metros de eslora, 5,50 metros de manga, 2,25 metros de puntal y un peso de 62,42 toneladas.

Fueron varias las embarcaciones de este tipo que construyó esta misma Sociedad en Bilbao entre los años 1917 y 1919, hasta que en mayo de 1919 se produce la botadura de un buque mercante de dimensiones superiores a las gabarras anteriormente descritas. Se trata del Carmelo I, un buque construido completamente en hormigón armado de 35,35 metros de eslora; 6,37 metros de manga; 3,10 metros de puntal; 620 toneladas de desplazamiento y 370 toneladas de capacidad; propulsado a motor y consiguiendo una velocidad de hasta 7,50 nudos. Según los asistentes a su botadura se trataba de un navío de líneas finas, airosa y bien proporcionada, pues se había calculado según las

exigencias de la arquitectura naval de la época, obteniendo la primera calificación con la letra A1 en el Lloyd's Register of Shipping⁶.

Experiencia en Santander

En la localidad cántabra de Polanco (González, 1968) se llevó a cabo la construcción en la Ría de Requejada de una embarcación un tanto singular como es la del Parsy (*Figura 48*), un velero pailebot de tres palos con 30,64 metros de eslora; 7,35 metros de manga; 4 metros de puntal; un desplazamiento de 322 toneladas y una capacidad de carga de 325 toneladas. Fue el ingeniero de la marina Don Antonio Pardo quien ordenó su construcción en 1918.

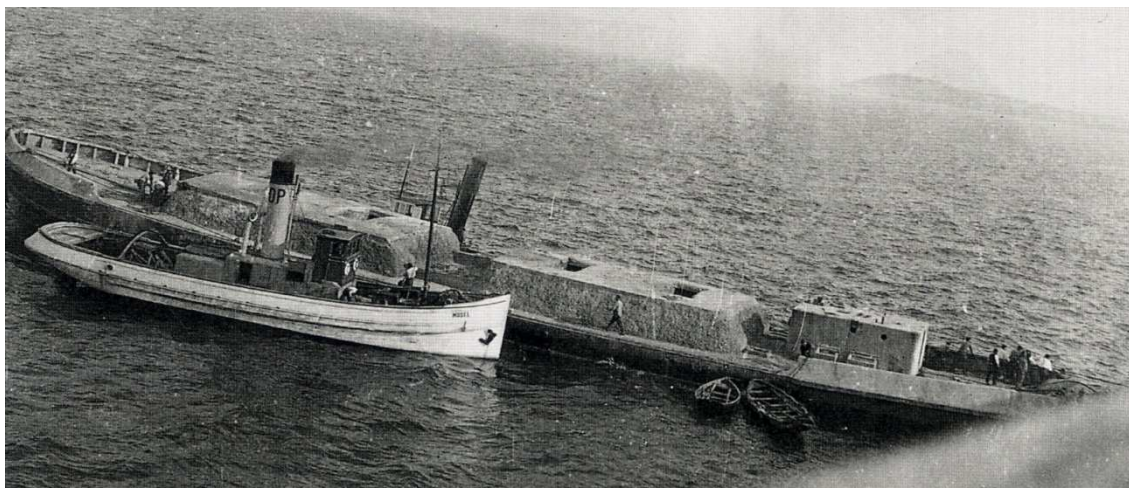


Figura 48. Fotografía tomada del Parsy en el puerto de Santander (González, 2006).

La construcción se llevó a cabo durante el verano de 1918 y el primer intento de botadura se realizó el día 22 de septiembre de ese mismo año, este era un proceso que presentaba grandes dificultades en los buques de hormigón armado, debido al gran peso del barco y el bajo coeficiente de fricción del hormigón. En la botadura del Parsy se usó un cable de retenida y una locomotora, pero el mayor problema vino al tomar contacto con el agua, pues la falta de estanqueidad del hormigón en la limera del timón hizo que la flotabilidad del buque fuera nula.

La reparación de este buque se hizo en la bahía de Santander, donde tuvo que estar fondeado cerca de medio año, hasta que en marzo de 1919 pudo zarpar hacia Cartagena

⁶ Organización de clasificación y análisis de riesgos de ámbito marítimo.

con 7 tripulantes y 325 toneladas de carbón (su capacidad máxima). Problemas con el timón y nuevamente con la falta de estanqueidad, hicieron que el Parsy se viniera a pique pocos días después de partir sin poder hacer nada por solucionar sus problemas. El casco se desguazó ya que no se pudo reflotar por falta de medios, únicamente se pudo rescatar el armazón metálico de la parte más accesible. Desde entonces está varado en la Peña Montefurado y aún a día de hoy se pueden ver los restos del casco en la arena de la Ría de El Barquero.

Experiencia en Barcelona

El principal exponente de la construcción naval de cemento armado, tanto en Catalunya como en España, fue la empresa Construcciones y Pavimentos S.A. propiedad de Joan Miró i Trepas, una empresa reconocida en todo el Estado por la construcción de edificios emblemáticos como el Hotel Palace de Madrid, cuya estructura estaba construida íntegramente en hormigón armado. En busca de diversificar su negocio constructivo, Joan Miró i Trepas decidió apostar fuertemente por la construcción naval con un material bien conocido por su empresa, el hormigón armado.

A mediados de 1917 se inició la construcción del primer barco a motor proyectado en hormigón armado (Sanahuja, 2007) por Construcciones y Pavimentos S.A., el Mirotres (Figura 49), un buque experimental. Su construcción se llevó a cabo en la playa de Sant Adrià de Besòs y pretendían formar al personal con la intención de poner en marcha una factoría de buques de hormigón armado de grandes dimensiones en Malgrat de Mar.

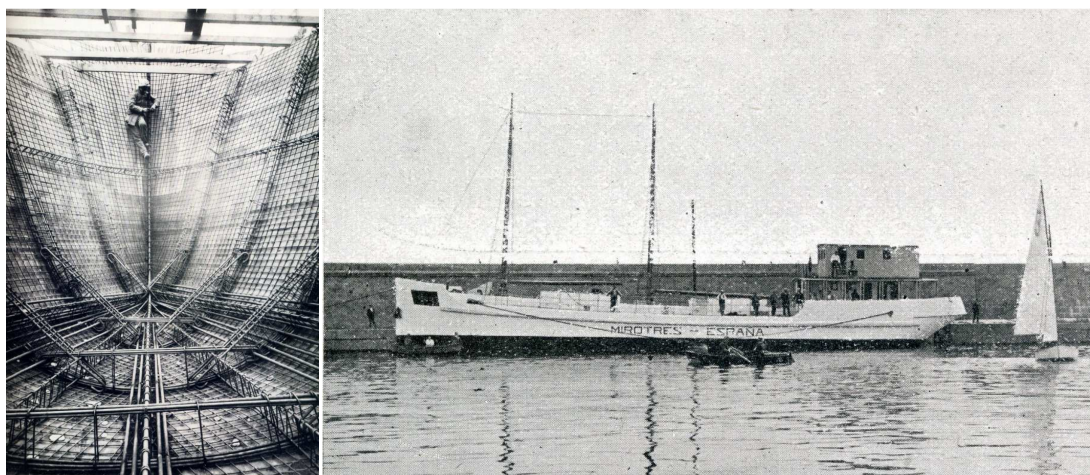


Figura 49. Detalle del armado del Mirotres. Toma general del bote (www.vidamaritima.com).

La motonave tenía 34 metros de eslora; 7,30 metros de manga; 3,50 metros de puntal; desplazamiento de 450 toneladas; y capacidad de carga máxima de 300 toneladas. Propulsado por un motor Bolinder que le permitía alcanzar la velocidad de 8 nudos. El cemento utilizado en su construcción fue cemento Asland, producido por la empresa General de Asfaltos y Portland S.A., primera fábrica de cemento industrial de Cataluña, inaugurada el año 1901.

La botadura era uno de los procesos más delicados de la puesta en marcha de los barcos de hormigón armado, pues podían aparecer esfuerzos para los que no se había calculado la estructura y se debía utilizar una maquinaria especial para reducirlos al máximo. La botadura del Mirotres (ver *Figura 50*) se realizó el día 15 de agosto de 1918, por no haber fondo suficiente en aquella playa fue botado de costado. Para su lanzamiento se tuvieron que construir unos raíles por donde se desplazó la gran masa hasta entrar en el mar, pero por deficiencias de construcción estas vías se rompieron con la mala suerte que un trozo de madera abrió un agujero en el casco del buque, en el cual empezó a entrar agua, quedando varado en la playa.

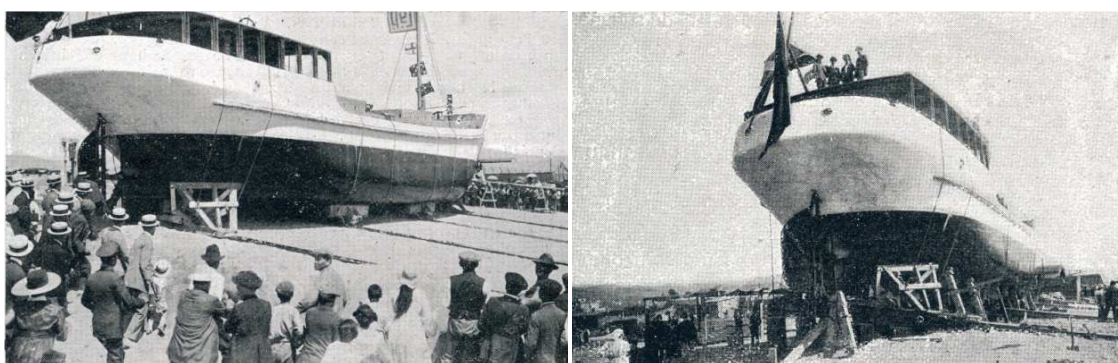


Figura 50. Proceso de botadura del Mirotres (www.vidamaritima.com).

Según los peritos, las duras pruebas a las que fue sometido el Mirotres en su lanzamiento no habrían sido resistidas ni por buques de acero ni de madera, confirmando así las esperanzas puestas en la robustez del hormigón armado para la construcción de buques. Inmediatamente, se procedió a reparar la avería y extraer el agua del interior del barco, consiguiéndose arreglar en menos de un mes.

La carrera del Mirotres fue muy corta, pues en la noche del 5 de agosto de 1920 se hundió cerca de Port Vendres (Francia) por culpa de uno de los puntos débiles de los buques de hormigón armado, su baja resistencia a los impactos directos en su casco.

Pero como se ha dicho con anterioridad, el Mirotres no era más que un buque experimental para formar al personal en la construcción de grandes buques de hormigón armado y ver los problemas y mejoras que se podían realizar en su construcción, pero el proyecto de la empresa Construcciones y Pavimentos S.A. era mucho más ambicioso, pretendían construir unos astilleros con capacidad para ejecutar a la vez hasta 5 barcos de 8000 toneladas (*Figura 51*).

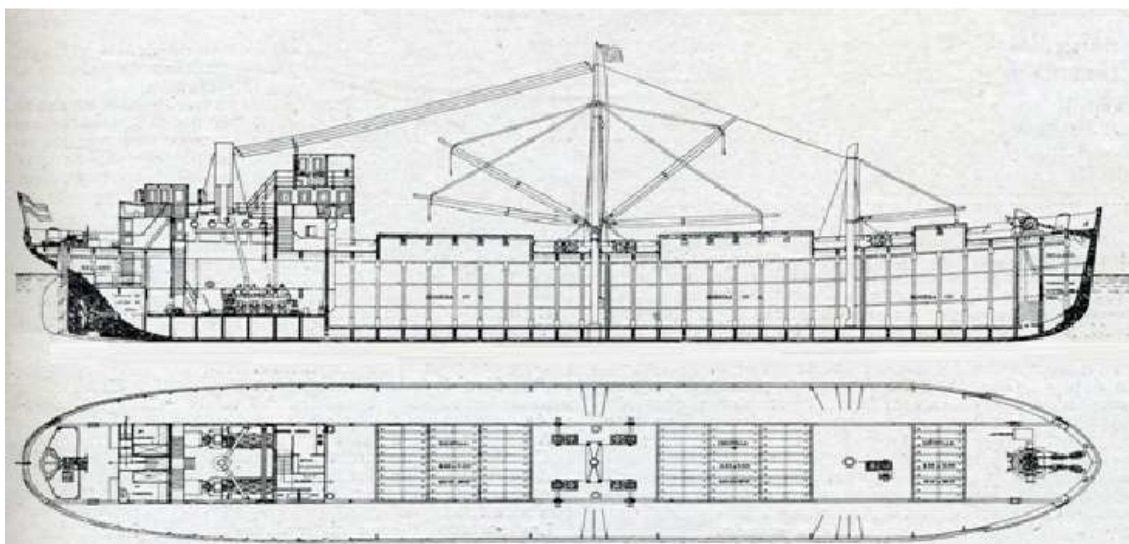


Figura 51. Planos de los buques proyectados por la compañía Construcciones y Pavimentos S.A. (www.vidamaritima.com).

Para ello adquirieron una importante extensión de terreno en las playas de Malgrat de Mar, a 50 kilómetros de Barcelona, concretamente 2300 metros de playa por 200 metros de profundidad. Se escogió la playa de Malgrat de Mar (*Figura 52*) ya que la batimetría de la zona presentaba unos fondos naturales capaces de recibir buques de hasta 20000 toneladas. El desembolso inicial para la construcción de estos astilleros fue muy elevado, teniendo grandes problemas de financiación.

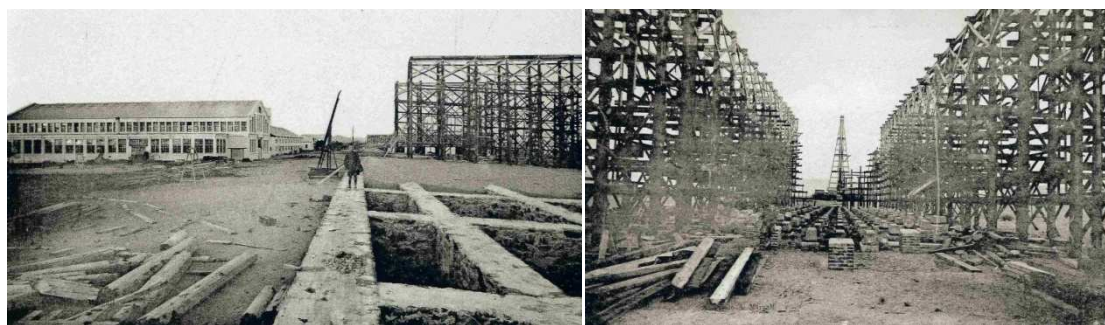


Figura 52. Fotografía de los astilleros construidos en Malgrat de Mar (www.vidamaritima.com).

Se calculaba que con la factoría a pleno rendimiento se tardaría en construir un buque de 2500 toneladas de tres meses y medio a cuatro. La primera serie de barcos serían cinco de 2340 toneladas cada uno. El tamaño de estos barcos era de 63,30 metros de eslora; 10,60 metros de manga; 5,75 metros de puntal; tres bodegas y propulsión diesel. Se comenzó la construcción de tres barcos de esta serie, pero el proceso quedó parado por el cierre de la factoría.

La mayor parte de las instalaciones fueron desmontadas entre 1930 y 1932 aunque hubo actividad hasta 1936. La culpa de este cierre se debió al menor rendimiento económico de los barcos de hormigón frente a los de acero cuando este material ya no escaseaba.

5.3.3. Comparativa de buques construidos en cemento armado, madera y acero

Un estudio realizado por la Emergency Fleet Corporation⁷ en el año 1918 demuestra la mayor viabilidad económica del acero para la construcción de buques. Para comparar los diversos materiales se escoge un buque tipo de hormigón, de 268 pies de eslora; 46 pies de manga y 28 pies de calado con un desplazamiento en carga máxima de 6175 toneladas. Realizando un buque de las mismas características se determinan algunos parámetros útiles mostrados en la *Tabla 12*:

Tabla 42. Comparativa de rendimiento de los barcos, valores en toneladas.

Característica	Cemento	Madera	Acero
Casco	2.500	2.300	1.160
Máquinas	206	206	200
Auxiliares, pertrechos y equipo	191	191	180
Margen	75	80	60
Total sin peso muerto	2.972	2.777	1.600
Reserva de alimentación	80	80	80
Artillería	23	23	23
Carbón	300	300	300
Cargos	40	40	40
Carga útil	2.760	2.180	3.057
Peso muerto	3.203	3.123	3.500
Desplazamiento en carga	6.175	5.900	5.100
Porcentaje de peso muerto á desplazamiento	52	53	68,6

⁷ Organismo norteamericano encargado de estudiar y mejorar el diseño de los buques.

Para los armadores, el mayor interés de esta comparativa era el valor del peso muerto, pues era lo que les generaba ingresos y quedaba demostrado que el buque de acero tenía unos valores mucho más óptimos para obtener beneficios económico que no los buques de cemento armado o de madera. La construcción naval en estos dos materiales solo se justifica en épocas de escasez de acero u otras circunstancias especiales.

5.3.4. Barcos de hormigón armado utilizados como diques

El bajo rendimiento económico de los barcos de hormigón armado frente a los de acero acabada la primera Guerra Mundial, un periodo de recuperación del acero como material principal de construcción naval, hizo que numerosos barcos de hormigón armado ya contruidos dejaran de utilizarse en las tareas para las que fueron concebidos. Se debía encontrar un uso para estas estructuras de grandes dimensiones, por sus cualidades pudieron reciclarse como diques de defensa en puertos, como por ejemplo, en el pequeño puerto de Candás en Asturias (Rodríguez, 2004).

En 1917, en plena Guerra Mundial, el Ministerio de Defensa inglés decidió encargar entre 130 y 140 lanchones de hormigón armado, poniendo a trabajar a 15 astilleros distribuidos por todo el Reino Unido. Habiendo finalizado la guerra se habían llegado a construir un total de 52 barcasas y 12 remolcadores, el resto de producción fue detenida y posteriormente cancelada.

En las memorias de los puertos españoles se puede encontrar la adquisición de una parte de estas embarcaciones, destacando Asturias con 13 unidades como principal destino, 2 fueron utilizadas en el puerto de San Esteban de Pravia, 2 más en el de Candás y 9 de ellas en el de Musel, Gijón.

La compra de estas embarcaciones de hormigón armado de más de 50 metros de eslora estuvo motivada por el menor coste en relación a los bloques o cajones utilizados en la defensa de puertos o protección de espigones. Aportando una mejor maniobrabilidad a la hora de transportarlos y hundirlos, así como un menor tiempo para incorporarlos a la construcción.

En la construcción del dique de abrigo del puerto de Candás (*Figura 53*), las condiciones de construcción eran muy restrictivas, pues se trataba de una obra

relativamente pequeña. No se podría contar con medios auxiliares potentes y costosos, por el escaso presupuesto de la obra. No se debía emplear ningún sistema lento que obligara a suspender las obras durante varios inviernos, pues supondría una avería en el extremo de la obra al no contar este con la resistencia ofrecida por un morro, con lo que el sistema debía ser lo suficiente rápido como para que en un verano o en dos se ejecutase toda la obra, sin requerir grandes grúas ni muchas instalaciones en tierra.

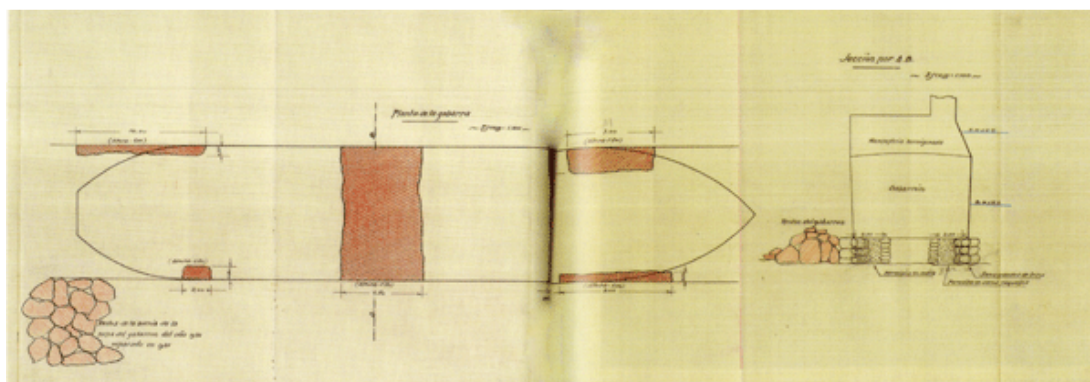


Figura 53. Plano de la sección del dique de Candás (Rodríguez, 2004).

Ante estas restricciones el uso de cajones de hormigón era una buena solución, pero económicamente resultaba más beneficioso utilizar las gabarras de hormigón adquiridas. El ingeniero Eduardo Castro demuestra la conveniencia de estas frente al uso de cajones, ya que se tenía que amortizar la grada de lanzamiento solamente con tres cajones, teniendo un coste de puesta en obra de 100000 pesetas (sin contar el transporte), muy superior a las 55000 pesetas de cada una de las gabarras de dimensiones similares al cajón. En la *Figura 54* se muestra la fotografía de una de estas gabarras hundidas utilizadas como dique en el Puerto de Candás.



Figura 54. Fotografía del dique ejecutado en el puerto de Candás (Rodríguez, 2004).

Capítulo 6: Conocimiento del hormigón armado en la época estudiada

6.1. Introducción

En la actualidad, los numerosos estudios y ensayos realizados en torno al hormigón armado, nos permiten tener un gran conocimiento de este material frente a casi cualquier tipo de sollicitación, así como los avances que se han realizado permiten optimizar su uso para cada tipo de estructura.

En el marco de esta tesina, resulta interesante conocer qué conocimientos tenían los ingenieros de la época del comportamiento del material en los primeros años de uso generalizado de hormigón armado. Para ello se ha recabado la información técnica disponible principalmente en la Revista de Obras Públicas, en la que los ingenieros de Caminos escribían las experiencias de sus obras realizadas y los estudios que hacían de este material.

6.2. Resistencia del hormigón

En 1902, José Eugenio Ribera presenta en su libro “Hormigón y cemento armado: Mi sistema y mis obras” la resistencia que llegaba a conseguir en el hormigón dependiendo de su dosificación. Para dosificaciones ricas en cemento Portland de 800 kg por m³ de masa, se conseguía una resistencia de 40 kg/cm² (~ 4 MPa); con 500 kg por m³ de

cemento, la resistencia se reducía a 35 kg/cm^2 ; mientras que la más habitual con 300 kg de cemento por m^3 proporcionaba una resistencia de 25 kg/cm^2 . En este documento, Ribera no cita la proporción de arena utilizada.

Anterior a los estudios de Fuller y Thomson en 1907, existía la creencia que la resistencia del hormigón estaba íntimamente ligada a la cantidad de cemento utilizada (Domouso, 2005), sin prestar prácticamente atención a la calidad y granulometría del árido. Este desconocimiento del comportamiento de hormigón provocaba un sobre coste en las obras debido al elevado precio de las cales o cementos.

En ensayos de laboratorio realizados por Zafra en 1922 se consigue una resistencia de 284 kg/cm^2 para una dosificación por metro cúbico de 300 kg de cemento Portland, 150 litros de agua, 383 litros de arena y 800 litros de gravilla, habiéndose seleccionado todo el árido a conciencia. Siendo este un caso aislado, la resistencia a compresión de cálculo habitual del hormigón utilizado en las obras de la segunda década del siglo XX variaba entre los 100 kg/cm^2 y los 200 kg/cm^2 .

6.3. Resistencia del acero

La tensión admisible del acero utilizado en las diferentes obras consultadas difiere entre los 8 kg/mm^2 ($\sim 80 \text{ MPa}$) y los 16 kg/mm^2 , mientras que la resistencia a corte de este mismo material se encuentra entre los 2 kg/cm^2 y los 5 kg/cm^2 . La gran variabilidad de estos datos se debe principalmente a la empresa de procedencia del acero.

6.4. Adherencia

Experimentalmente, la buena adherencia del hormigón armado queda demostrada en la obra del depósito de Llanes (Asturias) ejecutada en 1901 por José Eugenio Ribera, depósito de planta cuadrada cimentada (Ribera, 1901) sobre caliza dura con algunas cavernas rellenas de tierra arcillosa. Durante el proceso de llenado del depósito, la cimentación sobre tierra arcillosa falla, quedando las paredes de la zona afectada suspendidas de la cubierta, dando cuenta de la solidaridad con la que trabajan ambos materiales.

Un año más tarde, Fernando Rojo y Sojo, presenta una formulación para comprobar si la adherencia entre el hormigón y el metal contrarresta el esfuerzo tangencial (Rojo, 1902), para ello limita el diámetro de las barras en función del momento flector y esfuerzo cortante máximos de la viga, y de los esfuerzos resistentes del metal y de la adherencia entre el hormigón y metal.

6.5. Acción del agua del mar sobre los hormigones

Los primeros ensayos⁸ efectuados en EE.UU. en 1903 para determinar la influencia del agua del mar en los hormigones no muestran un claro conocimiento de su efecto. Únicamente se cita o que el agua del mar hace perder resistencia al mortero, o bien que se forma una costra superficial que con el tiempo se cae.

Tras producirse diferentes averías en estructuras en contacto con el mar, se realizan estudios más concretos del efecto del agua marina sobre el hormigón y los morteros utilizados.

Uno de estos estudios (Gaztelu, 1917), realizado por la “Comisión para el estudio de las cales y cementos de producción nacional” de acuerdo con la ponencia del ingeniero Juan Manuel de Zafra, hace mención a que las acciones destructivas del agua del mar sobre los hormigones armados y sin armar pueden ser de carácter físico o químico. Las primeras hacen referencia a las heladas que se producen en países fríos; las segundas a reacciones entre sulfatos magnésicos procedentes del agua del mar y de la cal libre de algunos cementos o del hidrato cálcico liberado durante el proceso de fraguado. Este ataque químico se produce con mayor facilidad cuanto más aluminoso es el aglomerante.

Las acciones químicas se producen con mayor facilidad cuanto más pronto después del proceso de fraguado se pone en contacto el hormigón con el agua del mar y se propagan del exterior al interior, gracias a la permeabilidad. Como es lógico, ante esta problemática, se recomienda no amasar el aglomerante con agua salada ni selenitosa.

⁸ Memoria presentada en el Congreso XII de la Asociación Americana para Ensayos de Materiales.

Para evitar averías en las obras construidas con aglomerantes hidráulicos, es necesario someter los morteros y hormigones lo más tarde posible a la acción del mar, consiguiendo que lleguen a un estado final de impermeabilidad.

6.6. Impermeabilidad del hormigón

Son dos procedimientos (Gaztelu, 1917) los comúnmente utilizados para conseguir la impermeabilidad del hormigón: aplicación de enlucidos especiales y uso de una correcta dosificación del hormigón. Los enlucidos, como se ha comentado en el caso de los cajones del puerto de Barcelona, se solían realizar con morteros de cemento y arena muy fina, incluso en casos excepcionales se llegaban a utilizar enlucidos de asfalto o de alquitrán, aplicados directamente sobre el hormigón o sobre telas preparadas.

El estado de impermeabilidad total de un conglomerado, al que se hacía referencia en el apartado anterior, se supone como aquel que ofrezca una compacidad absoluta, concepto más teórico que práctico, pero suficiente como para relacionar ambas características.

Experimentalmente se demostró como la arena fina aplicada en los morteros obtenía unos nefastos resultados en las obras marinas, con lo que un mortero adecuado para resistir la infiltración del agua del mar sería aquel cuyos elementos finos se redujeran únicamente al aglomerante, por ejemplo, una dosificación de 800 kilogramos de cemento por metro cúbico de arena gruesa.

Una solución más económica era la de sustituir parte de los elementos finos por materia puzolánica natural bien molida. En España, no era común esta materia, con lo que se optó por añadir a la mezcla puzolana artificial pulverizada.

La Comisión concluye su estudio con una serie de medidas para evitar las averías de las obras de hormigón armado en contacto con el mar:

- Empleo exclusivo de cementos lentos artificiales, de producción nacional.
- Estudio experimental concienzudo para: conocer las arenas y piedras, naturales o artificiales, disponibles en la zona; las dosificaciones de ellas y la posibilidad de

llegar a hormigones ciclópeos, la riqueza en aglomerante y la mejora económica y química del hormigón por la adición de puzolana artificial o natural.

- Amasado con agua potable; mano de obra experimentada; fraguado durante el máximo tiempo fuera del contacto con agua del mar.
- Limitación especial de la alúmina y del anhídrido sulfúrico a menos del 7% y del 1,75%, respectivamente.

6.7. Corrosión de las armaduras

La corrosión del acero en el interior del hormigón es un problema detectado por los ingenieros de la época, más aún en ambientes como los de las obras descritas en esta tesina, tanto en contacto con agua marina como dulce.

En 1907 se realiza un ensayo en EE.UU. para determinar los efectos de la corrosión en el hormigón armado del que la Revista de Obras Públicas se hace eco en España (Carter, 1907). Este ensayo consiste en sumergir tres bloques de hormigón armado con barras de hierro: uno sumergido en agua dulce atravesado por una corriente continua de 0,1 A, un segundo sumergido en agua de mar y atravesado por la misma corriente eléctrica y un tercero sumergido en agua de mar sin corriente eléctrica.

De los resultados de este ensayo se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Las construcciones en acero colocadas en agua salada o dulce están preservadas de la corrosión ordinaria por el hormigón.
- Las construcciones de acero cubiertas de hormigón que están sometidas a la acción del agua del mar están más expuestas a la acción electrolítica que las que están sometidas a la acción del agua dulce.
- Si pasa una corriente muy débil por la armadura metálica interior en el hormigón, se produce una corrosión del metal y desintegración del hormigón.
- En ningún caso se puede considerar el hormigón como un aislador; parece más bien que actúa como un electrolito.

6.8. Durabilidad

En ningún texto de los consultados para la realización de esta tesina se hace mención al recubrimiento mínimo de las armaduras como elemento de durabilidad de la estructura ni al tipo de exposición al que está sometida.

Únicamente, en los planos de la construcción del embarcadero de Zafra, se ha podido comprobar cómo la distancia entre el paramento exterior y el eje de las armaduras longitudinales de todas las piezas era de 30 milímetros, independiente del diámetro de la armadura.

Capítulo 7: Conclusiones

7.1. Conclusiones generales

- Se puede considerar la segunda mitad del siglo XIX como la época en que los puertos españoles inician su expansión provocado principalmente por el aumento de tráfico marítimo. La creación de Juntas para gestionar las obras dirigidas por titulados en Ingeniería de Caminos favorecen el rápido desarrollo.
- Hasta los inicios del siglo XX, los perfiles tipo utilizados en la construcción de muelles y diques se basan en la herencia de los ingenieros romanos en materia portuaria. Los muelles y diques, dependiendo de las condiciones de contorno de la obra, se construyen con bloques de hormigón, con hormigón en masa o con sistemas concertados.
- El uso de cajones, principalmente de hormigón armado, viene motivado por la necesidad de construir grandes monolitos para alcanzar calados cada vez mayores, siendo este un sistema más económico y de rápida ejecución que los sistemas concertados o de escollera.
- La concepción que se tenía de los cajones de hormigón armado era diferente a la actual, pues se consideraban como una parte más dentro de la estructura de defensa, no como ocurre con los diques verticales actuales en que el cajón es la única estructura resistente.
- El precio en valor absoluto de los materiales para la fabricación de hormigón ha sufrido un aumento considerable desde la época estudiada a la actualidad.

Relativamente, el precio del cemento ha disminuido en el conjunto de la mezcla gracias a la fuerte industrialización, mientras que el precio de los áridos ha aumentado debido seguramente al control de las canteras.

- El precio de la mano de obra utilizada en la construcción en 120 años ha aumentado en torno a 20 veces, mientras que los costes derivados de la puesta en obra de los materiales prácticamente no han variado, con lo que se puede pensar en que ha habido una transición en la forma de ejecutar las obras, desde el uso de gran cantidad de mano de obra barata hacia el uso de maquinaria especializada.
- El armado de las estructuras, hasta el año 1911 en que Zafra aporta una base de cálculo, se disponía según las experiencias en obras anteriores o patentes de empresas del sector.
- Los barcos de hormigón armado no solo no prosperaron por el bajo rendimiento frente a los barcos de acero, también por los problemas de estanqueidad y por la baja resistencia frente a los impactos.
- Se tenía conocimiento del ataque químico que provocaba el agua del mar sobre los hormigones de las estructuras. La solución propuesta por los ingenieros era la de impermeabilizar el hormigón mediante enlucidos de mortero o bien sustituir parte de los finos de la mezcla por elementos puzolánicos.

7.2. Conclusiones específicas

7.2.1. Respecto a obras tipo de finales del s. XIX

- El sistema de ejecución de muelles mediante hormigón sumergido era preferible al sistema con bloques de hormigón, pues aportaba un mayor monolitismo a la obra y resultaban más rápidos de ejecutar, el precio de construcción de ambos era muy similar.
- La cal de Theil, importada de Francia, era el ligante principalmente utilizado en la época para la fabricación de hormigones y representaba más de la mitad del coste total de los materiales de la mezcla. La dosificación del hormigón en masa sumergido, por las condiciones de fraguado, contenía mayor proporción de este componente que no el utilizado para fabricar bloques.

- El principal inconveniente del uso de bloques de hormigón era el coste de la maquinaria para ponerlos en obra, mientras que el del hormigón en masa sumergido era la disgregación que podía producirse en el agua.
- El sistema concertado era el principalmente empleado en toda Europa para la construcción de diques de abrigo hasta la llegada a principios del siglo XX de los cajones de hormigón armado. El aumento del precio de la piedra hizo que los ingenieros se decantaran por este sistema frente al de escollera.

7.2.2. Respecto a obras tipo de inicios del s. XX

- Sistemas de construcción tan poco convencionales como el explicado de los cajones de hierro de Bilbao, con las respectivas modificaciones, podrían ser válidos hoy en día tras un completo estudio de viabilidad, no solo existe una forma de construir.
- El proceso de construcción y ejecución utilizados en las obras de prolongación del dique del Este de Barcelona, permiten reducir al mínimo la armadura utilizada en la construcción de estos cajones.
- Se deja de utilizar la cal hidráulica para la fabricación de hormigones estructurales, a favor del cemento portland.
- La experiencia adquirida en la construcción de los cajones del dique del Este de Barcelona y el buen comportamiento una vez colocados, permitió que en el propio transcurso de la obra se fueran fabricando cajones cada vez de mayor longitud.

7.2.3. Respecto a otras estructuras ejecutadas en hormigón armado

- La esbeltez de las obras de los embarcaderos de Zafra y la respuesta ante las sollicitaciones tras pruebas de carga, demuestran el buen comportamiento del material trabajando a flexocompresión..
- Los principales intentos en España para desarrollar una industria dedicada a los barcos de hormigón armado se dan en Barcelona, teniendo al Mirotres como buque insignia.
- La utilización de barcos de hormigón como diques rompeolas es uno de los primeros casos de reciclaje de estructuras de hormigón.

7.2.4. Respecto al conocimiento del hormigón armado de la época

- Hasta los estudios de Fuller y Thomson de 1907 se tenía la falsa creencia que la resistencia del hormigón la aportaba la cantidad de cemento de la mezcla, sin hacer hincapié en la calidad y granulometría del árido.
- El mayor conocimiento que se tiene de las diferentes dosificaciones del hormigón permite en poco tiempo conseguir un gran aumento en la resistencia a compresión del hormigón, pasando de los 2,5 MPa habituales en los hormigones de los primeros años del siglo XX, hasta los 20 MPa de los hormigones utilizados en la segunda década del siglo.

7.3. Perspectivas de futuro

Los límites de esta tesina han abarcado un periodo concreto y una ubicación determinada, con lo que se han dejado muchos cabos sueltos. Desde mi punto de vista, serían interesantes dos líneas de investigación: el estudio a nivel internacional de los primeros usos de cajones de hormigón armado, entre los que se encuentran los usados en los puertos de Zeebrugge (Bélgica); y el estudio de la evolución de este tipo de estructuras para llegar a conseguir cajones de hormigón armado de las dimensiones de los actuales.

Capítulo 8: Bibliografía

8.1. Bibliografía referenciada

- Aixelà Juve, J. (1915). El puerto de Barcelona: reseña histórica y datos relativos a dos de sus obras más importantes. *Revista de Obras Públicas*, varios números.
- Angulo y Beltrán, C. (1903). *Modificación del perfil transversal tipo del dique del este*. Barcelona.
- Asociación Americana para Ensayos de Materiales (1910). Hormigón y hormigón armado. *Revista de Obras Públicas*, varios números.
- Bellido, S. (1882). *Proyecto de obras interiores para el puerto de la capital*. Tarragona.
- Bellido, S. (1884). *Proyecto de construcción del dique del Oeste*. Tarragona.
- Cámara Muñoz, A. (2005). *Los ingenieros militares de la monarquía hispánica en los siglos XVII y XVIII*. Madrid: AEAC.
- Carreras, A.; Tafunell, X. (2005). *Estadísticas históricas de España: Siglos XIX-XX*. Bilbao: Fundación BBVA.
- Carter, M. (1907). La corrosión electrolítica del hierro y del acero en el hormigón. *Revista de Obras Públicas*, núm. 1680, 655-656.
- Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía. (2007). *1905, la primera construcción de hormigón armado en Andalucía*. Sevilla.
- Churruca Brunet, E. (1882). Ampliación de la ría de Bilbao. *Revista de Obras Públicas*, varios números.
- Churruca Brunet, E. (1897). Estado y progreso de las obras del puerto y ría de Bilbao. *Revista de Obras Públicas*, varios números.
- Domouso de Alba, F. J. (2005). Manuales sobre hormigón y cemento armado en España: 1902–1910. Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz, 27-29 enero 2005.

- Escoda Murrià, C. (2002). *El port de Tarragona*. Barcelona: Lungwerg.
- Gaztelu, L. (1917). Acción del agua del mar sobre los cementos. *Revista de Obras Públicas*, núm. 2162, 101-103.
- González Cueli, F. (2006). El barco de cemento. *World Ship Society*.
- González Echegaray, R. (1968). *La marina cántabra. Desde el Vapor. Vol. III*. Santander.
- J.N. (1897). Empleo de cajones de hierro en la construcción de diques. *Revista de Obras Públicas*, núm. 1124, 356-360.
- Marsé, M. (1905). *Proyecto de construcción de nuevos diques*. Tarragona.
- Martínez, F. (1897). Monografía del puerto de Cartagena. *Revista de Obras Públicas*, varios números.
- Ministerio de Fomento (2003). Guía Histórica de Puertos y Faros. *Revista del Ministerio de Fomento*, núm. 520.
- Peña Olivas, José Manuel (2001). Ingeniería e Historia. *OP. Ingeniería y Territorio*, núm. 56, 16-25.
- Puerto de Barcelona (1905-1907). *Memoria sobre el estado y adelanto de las obras del puerto*. Barcelona.
- Puerto de Tarragona (1881-1892). *Memorias del puerto de Tarragona*.
- Puerto de Gijón (2005). *El Cabo de Torres y el puerto de El Musel. 25 siglos de historia*. Autoridad portuaria de Gijón.
- Ribera Dutaste, J.E. (1901). El depósito de hormigón armado de Llanes. *Revista de Obras Públicas*, núm. 1357, 341-344.
- Ribera Dutaste, J.E. (1902). *Hormigón y cemento armado: mi sistema y mis obras*. Madrid.
- Ribera Dutaste, J.E. (1925-1932). *Puentes de fábrica y hormigón armado*. Madrid.
- Rojo Sojo, F. (1902). Adherencia del metal en el hormigón armado. *Revista de Obras Públicas*, núm. 1374, 76-77.
- Rodríguez González, A. (2004). *Puerto de Candás proyectos, reformas y ampliación (Siglos XVI-XXI)*. Ed: Fundación saber.es.
- Sanahuja, V. Construcciones y pavimentos S.A. y el Mirotres. [En línea] En: Vida Marítima. [Consulta: 16 de noviembre de 2011]. 2007. Disponible en: <http://vidamaritima.com/2007/10/construcciones-y-pavimentos-s-a-y-el-mirotres/>
- Sanahuja, V. Ferrocemento, concrete ships, barcos y puertos... [En línea] En: Vida Marítima. [Consulta: 16 de noviembre de 2011]. 2008. Disponible en: <http://vidamaritima.com/2008/05/ferrocemento-concrete-ships-barcos-y-puertos/>
- Sanahuja, V. La serie nonata de buques de hormigón de Construcciones y Pavimentos S.A.. [En línea] 2008. En: Vida Marítima. [Consulta: 14 de noviembre de 2011]. Disponible en: <http://vidamaritima.com/2008/09/la-serie-nonata-de-buques-de-hormigon-de-construcciones-y-pavimentos-s-a/>

- Valdés, J. (1907). *Proyecto definitivo de la prolongación del dique del este*. Barcelona.
- Vigueras González, M. y Peña Abizanda (2001). Ingeniería e Historia. *OP. Ingeniería y Territorio*, núm. 56, 26-37.
- Yepes Piqueras, V. (2012). *¿Fueron los griegos buenos ingenieros?* Valencia.
- Zafra y Esteban, J.M. (1910). Nuevo embarcadero de hormigón armado en el Guadalquivir. *Revista de Obras Públicas*, núm. 1806, 209-216.
- Zafra y Esteban, J.M. (1911). *Construcciones de hormigón armado*. Madrid.
- Zafra y Esteban, J.M. (1914). *Construcciones de hormigón armado: Flexión Compuesta*. Madrid.

8.2. Páginas webs

- <http://ropdigital.ciccp.es/>
- <https://maps.google.es/>
- <http://vidamaritima.com/>
- <http://saber.es/>
- <http://www.panoramio.com>
- <http://www.todocoleccion.net>
- <http://guaitos.wordpress.com/>
- <http://victoryepes.blogs.upv.es/>
- <http://www.traianvs.net>
- <http://es.wikipedia.org/>

Anejo 1: Ensayos de los cementos

En diferentes documentos consultados (Churruca, 1896 y Marsé, 1905) se citan los controles a seguir para la comprobación la buena calidad de los cementos que se recibían en las obras. Eran los ingenieros responsables los que debían asegurar su completa sequedad, que los sacos estuvieran precintados y que el contenido estuviera enteramente pulverizado. Una vez comprobados estos tres aspectos, se procedía a realizar los ensayos relativos a:

- La finura
- Prueba en agua hirviendo
- Composición química
- La duración del fraguado
- La falta de grietas después del fraguado
- La resistencia de las pruebas de cal pura o cemento puro
- La resistencia de las pruebas de cal o cemento con arena normal

Finura

Se toman 100 gramos de cemento, pesados en una balanza de precisión, y se introducen en la parte superior de una capa cilíndrica de latón que contiene dos tamices, el primero o superior de 900 mallas por centímetro cuadrado (equivalente ASTM malla N° 45), y el

segundo de 5000 mallas (equivalente ASTM malla N° 100) en igual superficie. Se agita rápidamente esta capa, van quedando en el primer tamiz las partículas más gruesas que el cemento tiene, no deben exceder del 10% de la cantidad que se ensaya. En el segundo tamiz quedan las partículas más finas, que sumadas con las del primero no deben exceder del 35% del total ensayado, de modo que el polvo fino que pasa a través de ambos tamices debe ser al menos del 65% del total.

Estas pruebas de la finura del cemento son de gran importancia, pues la parte que no pasa por el tamiz de 900 mallas puede decirse que es materia inerte, que no juega otro papel que la arena fina de buena calidad en el fraguado y endurecimiento del cemento. La que pasando por el tamiz anterior queda sin pasar en el de 5000 mallas suele fraguar y endurecerse después de amasado con agua, aunque no adquiere nunca una resistencia comparable al de la masa hecha con el polvo fino que pasa a través de este último tamiz, que es verdaderamente la parte más energética del cemento y que conviene sea la mayor posible moliendo el cemento con perfección.

Prueba en agua hirviendo

Este ensayo tiene por objeto el conocer si el cemento tiene alguna cantidad de cal libre o sin combinar, ya que la cal sin combinar era la causa fundamental de la descomposición de los cementos en el agua del mar. Esta prueba se realiza amasando 450 gramos de cemento en polvo con 100 gramos de agua, con esta mezcla se lleva un molde cilíndrico sin fondo de 10 centímetros de diámetro y 2 centímetros de altura, formándose al fraguar una galleta de estas dimensiones. Se deja al aire libre durante 24 horas y se coloca en una vasija con agua a la temperatura ordinaria, que se pone encima de una lámpara de alcohol, mediante la cual entra el agua en ebullición en el espacio de una hora.

Se tiene la galleta en agua hirviendo durante tres horas como mínimo, tras lo que se retira la lámpara y se deja enfriar el agua. Retirada la galleta se observa con cuidado si tiene grietas o si su cohesión se ha alterado, en cuyo caso puede sospecharse que el cemento contiene alguna parte de cal en estado libre, que al hidratarse ha aumentado de volumen y desagregado la masa de la galleta, por lo cual no debe emplearse sino después de repetir la prueba varias veces y comprobar con algunos ensayos químicos la

composición del cemento. Si la galleta ha aumentado mucho de volumen o se ha deshecho en el agua hirviendo, puede considerarse el cemento como de mala calidad y de empleo peligroso. Si la galleta ha resistido bien a la prueba del agua hirviendo sin producirse grietas ni aumentar su volumen, ni disminuir su cohesión, puede determinarse que el cemento es bueno, es decir, que no contiene cal libre en su composición.

Composición química

En los pliegos de condiciones se exige que el cemento no contenga más de 1% de ácido sulfúrico, cuya sustancia suele proceder del sulfato de cal o yeso que contienen algunas rocas empleadas en la fabricación del cemento y que la experiencia prueba que es perjudicial, muy especialmente para los trabajos marítimos. La calidad de la composición del cemento viene determinada por el control de calidad seguido en el proceso de fabricación del compuesto. Teniendo en cuenta que el análisis químico requiere montar un laboratorio en obra, este ensayo únicamente se lleva a cabo en el caso que habiendo realizado los demás ensayos se dude sobre la calidad de este, para ello se envía una muestra a analizar a laboratorios externos, como la Escuela de Minas de Madrid o al laboratorio de la Escuela de Puentes y Calzadas de París.

En la *Figura 55* y en la *Figura 56* se muestran los resultados de los análisis químicos de dos ensayos del cemento utilizado en el puerto de Bilbao.

DESIGNACIÓN DE LAS SUSTANCIAS QUE CONTIENEN	Cemento de la «Société des ciments français de Boulogne sur mer.»	Cemento de la «Compagnie Nouvelle».
Silice.....	23,00	22,40
Aluminio.....	8,05	8,30
Peróxido de hierro.....	2,45	2,60
Cal.....	63,40	62,45
Magnesia.....	0,85	0,80
Acido sulfúrico.....	0,42	0,43
Pérdidas en el fuego....	1,75	3,00
Productos no dosificados ó pérdidas.....	0,08	0,02
TOTALES.....	100,00	100,00

Figura 55. Resultado Análisis 1 Composición química del cemento del puerto de Bilbao (Churrua, 1896).

DESIGNACIÓN DE LAS SUSTANCIAS QUE CONTIENEN	Cemento de la «Société des ciments français de Boulogne sur mer».	Cemento de la «Compagnie Nouvelle».
Residuo insoluble en ácido clorhídrico.....	0,890	0,380
Sílice soluble.....	22,110	21,710
Alúmina.....	6,296	6,892
Oxido férrico.....	2,790	3,171
Cal.....	64,340	64,440
Magnesia.....	0,803	0,411
Ácido sulfúrico.....	0,699	0,355
Idem carbónico.....	0,111	0,172
Agua.....	1,872	2,395
Pérdidas.....	0,089	0,074
TOTALES.....	100,000	100,000

Figura 56. Resultado Análisis 2 Composición química del cemento del puerto de Bilbao (Churruca, 1896).

Duración del fraguado

Para determinar el principio y duración del fraguado, se amasarán 900 gramos de cal o cemento con la paleta sobre una placa de mármol durante 5 minutos, empleando la cantidad de agua correspondiente a la proporción normal determinado en el ensayo de composición química, vertida de una sola vez. Se cogerá una parte de la pasta obtenida y se llenará con ella una caja cilíndrica de metal de 4 centímetros de altura y 8 centímetros de diámetro, a la que se le imprimirán tripiolaciones, que harán refluir agua que no se quitará. Después se suspenderá encima, por medio de un hilo, una aguja prismática que pese 300 gramos y que tenga una sección cuadrada de 1 milímetro de lado.

El principio del fraguado se considerará el momento en que la masa no se deje atravesar enteramente por la aguja, haciendo descender a esta lentamente. Se considerará terminado el fraguado cuando la superficie de la pasta pueda soportar a la aguja sin que esta penetre sensiblemente.

La pasta de cal de Theil, tardará en comenzar a fraguar de 6 a 12 horas y en concluir de 15 a 30 horas. La pasta de cemento de Portland no deberá comenzar a fraguar antes de 30 minutos y debe tardar en concluir después de 2 horas y media y antes de 12 horas. Todos estos plazos se contabilizarán desde el momento en que se eche el agua sobre el polvo seco de cal o de cemento, manteniendo en todo instante una temperatura exterior entre 15 y 18 grados centígrados.

Falta de grietas después del fraguado

De la pasta sobrante del ensayo anterior se harán pequeños panes circulares de 8 a 10 centímetros de diámetro, cuyo espesor de 2 centímetros irá disminuyendo hacia los bordes, donde será muy pequeño. Posteriormente, serán sumergidos en un depósito lleno de agua del mar cuya temperatura esté entre 15 y 18 grados centígrados. Si antes de la recepción definitiva se observan grietas se observan grietas en cualquiera de estos panes, será desechado el cemento o la cal.

Resistencia a la tracción de las pruebas de cal pura o cemento puro

La parte de cal o de cemento destinado a los ensayos de resistencia a la tracción se obtendrán amasando con la paleta, sobre una placa de mármol, durante 5 minutos, 900 gramos de cal o de cemento, con la proporción normal de agua de mar determinada anteriormente. Con esta pasta deberán llevarse a cabo 6 ensayos con 18 probetas cada uno. Las pruebas tendrán en la sección de rotura 225 milímetros de ancho y 222 milímetros de espesor, generando un área de 5 centímetros cuadrados.

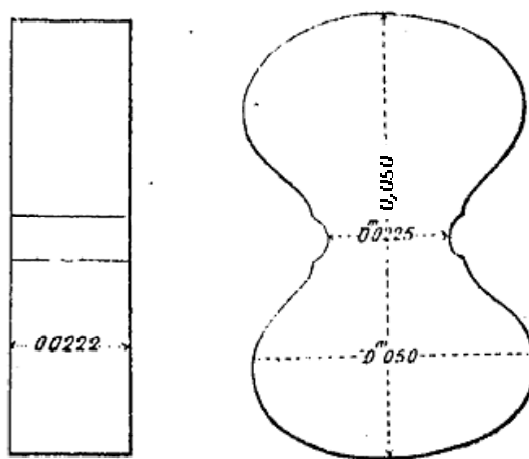


Figura 57. Probeta para calcular la resistencia a tracción del cemento (Churruca, 1896).

Durante las 24 horas siguientes al principio del amasado se mantendrán estas probetas (Figura 57) sobre la misma placa de mármol o metal, en una atmósfera húmeda, abrigadas de corrientes de aire y de los rayos directos del sol, a una temperatura de entre 15 y 18 grados centígrados. Pasadas estas primeras 24 horas, serán sumergidas en un

depósito lleno de agua del mar. El agua de este depósito será renovada cada semana y su temperatura deberá estar entre 15 y 18 grados centígrados.

Con cada porción de cal o de cemento se harán 18 probetas y serán ensayadas 6 al cabo de 7 días, 6 a los 28 días y las últimas 6 a los 84 días, contando a partir del momento en que se haga la pasta. Las probetas se romperán por extensión, empleando el aparato de doble palanca ordinariamente usado, en el que el peso creciente que produce la tracción se obtiene por la entrada continua de perdigones en un vaso suspendido a la extremidad de una de las palancas (*Figura 58*).

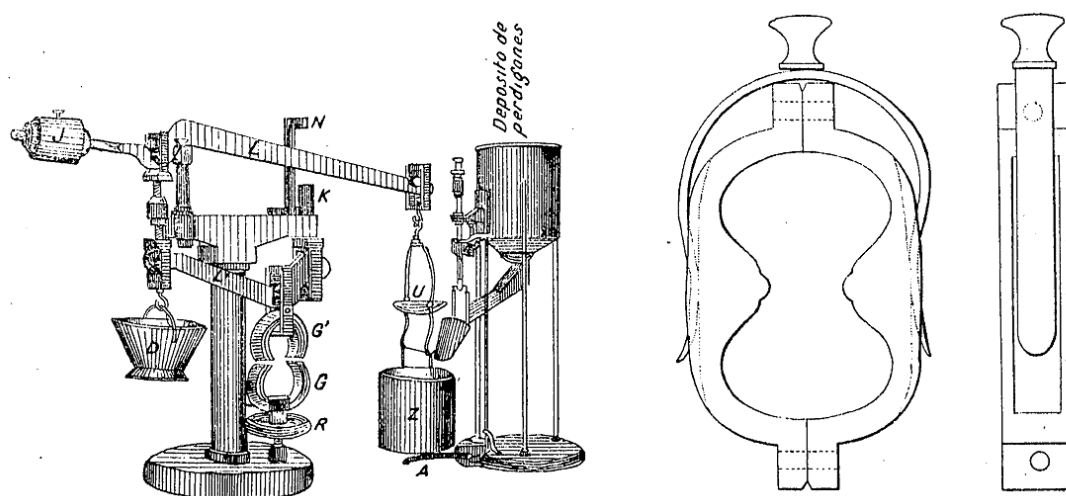


Figura 58. Instrumentación utilizada para la comprobación de la resistencia a tracción del cemento (Churruga, 1896).

La resistencia del ensayo se obtendrá haciendo la media de los 3 resultados mayores de los 6 realizados en cada serie. La resistencia a tracción para la pasta de cal pura será al menos de 3, 8 y 15 kilogramos por centímetro cuadrado a los 7, 28 y 84 días, respectivamente. Para el cemento puro la resistencia debía de ser como mínimo de 20, 35 y 45 kilogramos por centímetro cuadrado en los mismos plazos.

Resistencia a la tracción del mortero de cal o cemento y arena normal

El mortero se compondrá de una parte de cal o cemento y tres partes de arena normal (1:3). La arena estará fabricada de forma artificial por la trituración de cuarcitas. Se sigue el mismo proceso que en el caso anterior en cuanto a fabricación de las probetas, periodos de curado, etc. La resistencia a tracción del mortero de cal será como mínimo de 2, 5 y 9 kilogramos por centímetro cuadrado a los 7, 28 y 84 días, respectivamente. En el caso de las probetas de mortero de cemento, su resistencia a la tracción debe ser

por lo menos de 8, 14 y 18 kilogramos por centímetro cuadrado en las mismas fechas que anteriormente.

En la *Figura 59* se muestran las gráficas de la resistencia a tracción de tipos de cemento de diferentes procedencias para cada una de las edades.

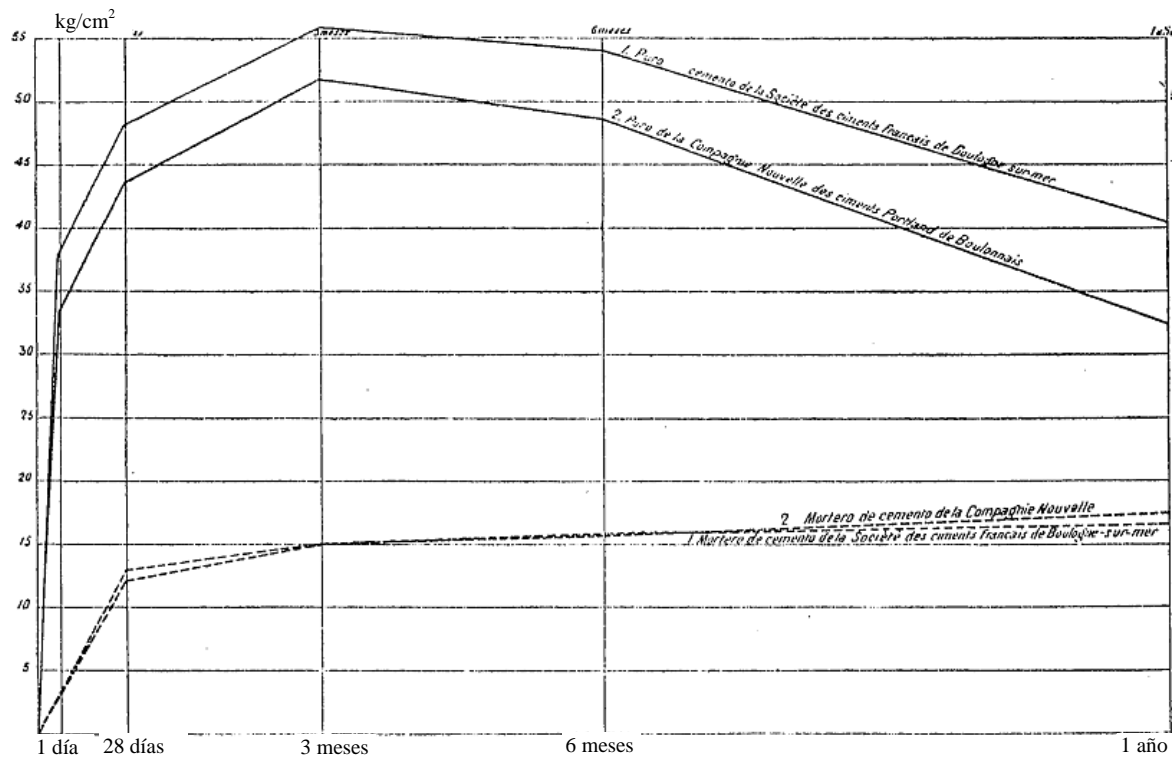


Figura 59. Gráfica de la resistencia a tracción de diferentes compuestos (Churruga, 1896).